

Revisión

Impacto de los Factores Abióticos en las Propiedades Fisicoquímicas del Fruto de *Opuntia* spp.

Rigoberto E. Vázquez-Alvarado ^{1*}; Emilio Olivares-Sáenz ¹; Ma. del Carmen Ojeda-Zacarías ¹; Víctor E. Aguirre-Arzola ¹; Joel H. Elizondo-Luévano ¹; Nirvana S. Ramírez-Tejeda ¹

¹ Universidad Autónoma de Nuevo León, Campus de Ciencias Agropecuarias, Facultad de Agronomía, Francisco Villa s/n, Colonia Ex-Hacienda El Canadá, 66054 Escobedo, Nuevo León, México. rigoberto.vazquezal@uanl.edu.mx (R.E.V.-A.); emilio.olivaressn@uanl.edu.mx (E.O.-S.); maria.ojedazc@uanl.edu.mx (M.del-C.O.-Z.); victor.aguirrearz@uanl.edu.mx (V.E.A.-A.); joel.elizondolv@uanl.edu.mx (J.H.E.-L.); nirvana.ramirezta@uanl.edu.mx (N.S.R.-T.)

* Correspondencia: rigoberto.vazquezal@uanl.edu.mx (R.E.V.-A.); Tel.: +52 81-1166-7245

Resumen: *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill es una especie de cactus ampliamente distribuida en regiones áridas y semiáridas, que depende en gran medida de factores ambientales para su reproducción exitosa. Este estudio se centra en comprender cómo los factores abióticos, como la temperatura, la luz, la humedad y la disponibilidad de nutrientes, influyen en el desarrollo del fruto de *O. ficus*, conocido como tuna, especialmente las precipitaciones y las características del suelo. Se ha observado que las variaciones en estos factores pueden afectar significativamente a los procesos de polinización, fertilización, crecimiento y maduración del fruto. Esto es importante para comprender la biología de la planta y su gestión en entornos agrícolas y de conservación. Los objetivos de esta revisión sistemática se centran en analizar los reportes de cómo los factores abióticos afectan la floración y consecuentemente el llenado y desarrollo del fruto de *O. ficus*, presentados en la literatura científica entre los años 2014 - 2024. Los resultados de esta revisión pueden contribuir al diseño de prácticas agrícolas sostenibles y a la conservación de la biodiversidad en ecosistemas áridos y semiáridos.

Palabras clave: *Opuntia*; tuna; abióticos; suelo; precipitaciones.

Impact of Abiotic Factors on the Physicochemical Properties of the Fruit of *Opuntia* spp.

Abstract: The *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill is a species of cactus widely distributed in arid and semi-arid regions, largely dependent on environmental factors for its successful reproduction. This study focuses on understanding how abiotic factors, such as temperature, light, humidity, and nutrient availability, influence the development of *O. ficus* fruit, known as prickly pear, especially precipitation and soil characteristics. It has been observed that variations in these factors can significantly affect the processes of pollination, fertilization, growth, and fruit maturation. This is important for understanding the plant's biology and its management in agricultural and conservation settings. The objectives of this systematic review are focused on analyzing reports of how abiotic factors affect flowering and consequently the filling and development of *O. ficus* fruit, presented in the scientific literature between the years 2014 – 2024. The results of this review may contribute to the design of sustainable agricultural practices and the conservation of biodiversity in arid and semi-arid ecosystems.

Keywords: *Opuntia*; prickly pear; abiotic; soil; precipitation.

1. Introducción

El nopal (*Opuntia ficus indica*), originario de México, perteneciente a la familia Cactaceae, se encuentra distribuido en América Latina, Sudáfrica y el Mediterráneo (Inglese *et al.*, 2002). La composición del fruto, donde la cáscara puede

representar hasta el 55% y la pulpa hasta el 67%, junto con su potencial como fuente de aceites comestibles insaturados, lo convierten en un recurso valioso (Piga, 2004; Arrizon *et al.*, 2006; De Wit *et al.*, 2020).

La resiliencia de las Cactaceae a condiciones de sequía y altas temperaturas, gracias al metabolismo CAM, ha generado un renovado interés agronómico, especialmente en contextos de cambio climático (Sáenz, 2013). Asimismo, su explotación en industrias cosmética y nutracéutica, junto con el interés creciente en sus frutos frescos, resalta sus propiedades funcionales y composición única (ElMostafa *et al.*, 2014; Kuti, 2004; Martínez, Esparza, & Fragoso, 2014; Pimienta-Barrios, 1994; Stintzing *et al.*, 2005; Sáenz & Sepúlveda, 2001; Sáenz, 2013). Este interés ha promovido incluso su introducción en el resto del mundo, con impactos significativos en el sur de Europa (Allegra *et al.*, 2015; Piga *et al.*, 2003; Kyriacou *et al.*, 2016).

La adaptación de las *Opuntia* a condiciones áridas y semiáridas, su valor nutricional y su contribución a la economía local en estas regiones, subrayan su importancia como uno de los pilares agrícolas en tales entornos (Arba *et al.*, 2022). Sin embargo, persisten desafíos en regiones como el sur del Mediterráneo, donde las prácticas de cultivo tradicionales limitan su rendimiento y calidad (Arba *et al.*, 2022).

Muchos de los compuestos y características físicas de los frutos de muchas plantas están regidas debido al acondicionamiento donde se encuentran. Se sabe que *Opuntia* spp. en condiciones de clima frío tiende a un desarrollo del fruto más lento al presentado en climas cálidos, demostrado en trabajos como el de López-Zúñiga (2022), o los trabajos de Rodríguez *et al.* (2023) donde aunque no hablan específicamente del impacto de las condiciones climáticas frías en el desarrollo del fruto, nos menciona las distintas características presentadas en los frutos recolectados de distintas regiones con diferencias significativas entre su temperatura y cantidad de precipitación anual.

La relación entre las características nutricionales de los frutos de *Opuntia* spp., los compuestos del suelo y la cantidad de precipitación es un tema de interés en la investigación agrícola y de nutrición de plantas. Diversos estudios han intentado comprender cómo los compuestos del suelo, incluyendo nutrientes y minerales, así como la cantidad de precipitación, influyen en las propiedades nutricionales de los frutos de cactus como las investigaciones de Mondragón Jacobo (2003). La composición del suelo y la cantidad de precipitación pueden tener un impacto en la disponibilidad de nutrientes para todas las plantas, lo cual de forma directa puede influir en la calidad nutricional de los frutos como lo mencionan diversos autores (Inglese *et al.*, 2018; Santiago-Lorenzo *et al.*, 2016). Por lo que, con la recopilación de distintos artículos, se pretende relacionar las características de la zona donde se extrae el material vegetal de *Opuntia* spp. en sus características físicas y composición química de los frutos (Véase Gráfico 1).



Gráfico 1. Abstracto gráfico

2. Materiales y Métodos

En la búsqueda de literatura se utilizaron bases de datos científicas de PubMed, y Google Scholar, utilizando las siguientes palabras clave "MESH" de búsqueda (en inglés debido al idioma de los sitios: "*Opuntia ficus*"; "*Opuntia ficus indica*"; "Prickly pear") como filtros para buscar en todos los campos se utilizaron las palabras: "climate", "temperatura", "precipitation" y "composition". De los artículos resultantes de la búsqueda, se leyeron atentamente los títulos,

después los resúmenes, y finalmente de forma breve todo el contenido para seleccionar y revisar los estudios relevantes (Total: 44). La búsqueda se enfocó en un lapso de 10 años hacia atrás que comprendió desde diciembre 2014 a abril 2024.

Se incluyeron artículos originales escritos en inglés y español. El proceso se llevó a cabo siguiendo las directrices del Diagrama de Flujo PRISMA como se presenta en la Gráfico 2.

Para determinar la similitud entre las diversas zonas de donde se obtuvieron los materiales vegetales de los artículos, en caso de que los autores no proporcionaran la información, se extrajo dicha información de la base de datos ClimaMundi (<https://es.climate-data.org/>; revisado el 12 de abril de 2024) donde para propósitos de esta revisión, se tomaron en cuenta los milímetros de precipitaciones y grados centígrados de las temperaturas medias, máximas y mínimas normales anuales. Los datos recopilados se analizaron con el programa Statistical Package for the Social Sciences (IBM, SPSS Versión 21) se empleó el método de conglomerado jerárquico. En base al dendograma resultante del conglomerado se agruparon las zonas geográficas similares en base a sus características climáticas.

3. Resultados y discusión

3.1. Características Climáticas de las zonas de estudio

Los resultados del análisis dendrográfico, presentados en la Gráfico 3, revelaron la formación de tres grupos distintos y claramente definidos resultados obtenidos tras un promedio de 30 años según Clima Mundi, los cuales serán referidos como grupos 1, 2 y 3 respectivamente, caracterizados por (Véase la Tabla 1):

- El Grupo 1 se caracteriza por una precipitación anual de 528.6 mililitros, acompañada de una temperatura máxima promedio de 24.8 °C, una temperatura media anual de 17.4 °C y una temperatura mínima anual de 10.3 °C.
- El Grupo 2 presenta una precipitación anual más elevada, alcanzando un promedio de 894.5 mililitros, junto con una temperatura de entre las 3 la más fría con una máxima anual de 22.0 °C, una temperatura media anual de 17.6 °C y una temperatura mínima anual de 13.0 °C.
- El Grupo 3 exhibe la precipitación anual más baja de los tres grupos, con un promedio de 245.6 mililitros, mientras que las temperaturas registradas son de 23.9 °C para la máxima anual, 18.6 °C para la media anual y 13.5 °C para la mínima anual.

Tabla 1. Datos climatológicos característicos de cada grupo.

Grupo	Precipitación (mm)	Temperatura (°C)		
		Máxima	Media	Mínima
1	894.5	22.0	17.6	13.0
2	395.2	24.3	17.6	11.0
3	245.6	23.9	18.6	13.5

¹ Características climatológicas de los grupos 1, 2 y 3. mm: milímetros; °C: grados centígrados.

3.2. Factores abióticos que influyen en el desarrollo de *Opuntia ficus-indica*

El cultivo del nopal presenta una amplia variación en importantes rasgos de composición, incluyendo contenidos fenólicos, carbohidratos, pigmentos y fibras solubles/insolubles, entre otras los cuales se ven afectados por factores genotípicos, ambientales y culturales, aunque la investigación en general sigue siendo limitada. La evaluación de la calidad de la fruta se realiza comúnmente en el momento de la cosecha (Kyriacou *et al.*, 2016), sin embargo, no se sabe a ciencia cierta la diferencia respecto a la maduración del fruto, los resultados pueden no reflejar adecuadamente las diferencias genotípicas, y de forma errónea atribuyamos las características a factores no tan relevantes. Además, factores ambientales como la lluvia y las unidades de calor acumuladas también influyen en la composición del fruto, especialmente en azúcares, acidez y color (Coetzer *et al.*, 2019).

La temperatura máxima y las precipitaciones durante los meses previos a la cosecha tienen un impacto significativo en los parámetros de calidad del fruto, lo que sugiere que condiciones climáticas específicas pueden contribuir a la producción de frutas de mejor calidad en el cultivo de *Opuntia ficus* (Coetzer *et al.*, 2019). El desarrollo de *Opuntia ficus* está influenciado por diversos factores abióticos, entre los cuales las precipitaciones juegan un papel crucial. Investigaciones han demostrado que altas precipitaciones en noviembre pueden incrementar los sólidos solubles totales (SST), fructosa y acidez titulable (TA) del fruto, aunque disminuyen el contenido de glucosa (Coetzer *et al.*, 2019).

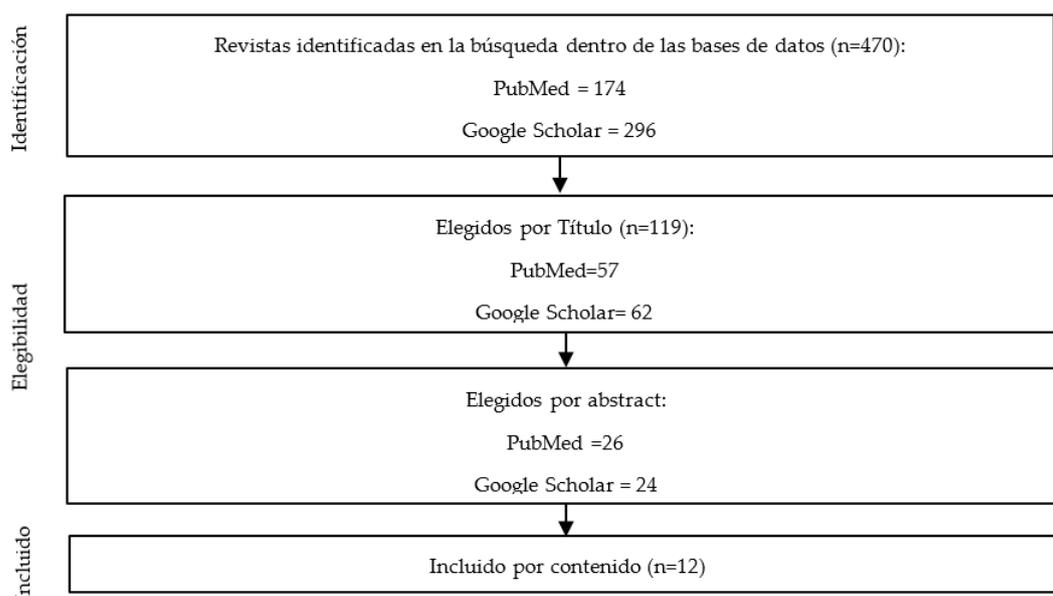


Gráfico 2. Diagrama de Flujo PRISMA

Por otro lado, durante épocas de lluvias más intensas, se observa un aumento en la masa del fruto y el contenido de pulpa, lo que resulta en una disminución del contenido de SST (Inglese *et al.*, 1995; Coetzer *et al.*, 2019). En contraste, periodos de escasas precipitaciones, pueden percibirse como estrés por sequía, lo que conlleva a un aumento en el contenido de SST. Además, la caracterización de los genotipos de nopal cultivado ha revelado una amplia variación en su composición, incluyendo compuestos fenólicos, carbohidratos, pigmentos y fibras (Kyriacou *et al.*, 2016).

Por ejemplo, el crecimiento del fruto se ve influenciado por diversos factores, como la presencia de semillas que representan entre un 2% y un 10% de la pulpa, y son consideradas buenas fuentes de aceites comestibles insaturados (De Wit *et al.*, 2020). No muchos autores nombran la importancia del suelo en la calidad del fruto, aunque gracias al trabajo de Santiago *et al.* (2016) se tiene conocimiento que la calidad de los nutrientes disponibles para las plantas está mediada en la composición del suelo y la precipitación (Inglese *et al.*, 2018; Santiago-Lorenzo *et al.*, 2016). Se ha destacado la importancia de los efectos genotípicos, ambientales y culturales en esta variación a lo largo de los estudios. Sin embargo, la comprensión sobre el comportamiento de maduración, los efectos en la calidad respecto al clima, y composición del fruto sigue siendo limitada. Este conocimiento es fundamental para una evaluación precisa de la calidad de la fruta, ya que las diferencias aparentemente genotípicas o climáticas pueden reflejar en realidad un comportamiento que eleve el rendimiento del cultivo (Kyriacou *et al.*, 2016).

3.3. Características de los frutos en el grupo 1

Influenciado por una temperatura media anual de 17.62 °C, el Grupo 1 se caracteriza gracias a los trabajos de Belviranlı *et al.* (2019) y Juhaimi *et al.* (2020) donde se pueden encontrar diferencias en las composiciones de los frutos extraídos de las distintas localidades donde extrajeron los frutos.

3.3.1. Concentración de azúcares

En primer lugar, al examinar los datos proporcionados por Belviranlı *et al.* (2019) de los materiales localizados en Adana, Alanya, Anamur, Fethiye e Iskenderum (Tuna extraída y nombrada con el nombre de la ciudad de procedencia), se observaron concentraciones notables de fructosa (26.53 mg/ml) y glucosa (38.92 mg/ml), indicando una rica presencia de azúcares simples en esta variedad; la muestra de Alanya exhibió niveles ligeramente superiores de estos azúcares, con 29.17 mg/ml y 44.71 mg/ml, respectivamente. La variedad de Anamur exhibió un promedio de fructosa ligeramente superior en comparación con Fethiye e Iskenderum, con valores de 25.34 mg/ml, 24.95 mg/ml y 26.5 mg/ml respectivamente. Siendo Alanya con la mayor cantidad de fructosa de las 5 variedades.

Este ligero cambio podría atribuirse a variaciones en la madurez de la fruta al momento de la recolección o a factores ambientales y edáficos específicos de cada región, ya que por ejemplo la región de Alanya posee 200 mm más de precipitación que Adana y solo 3 mm menos que Fethiye.

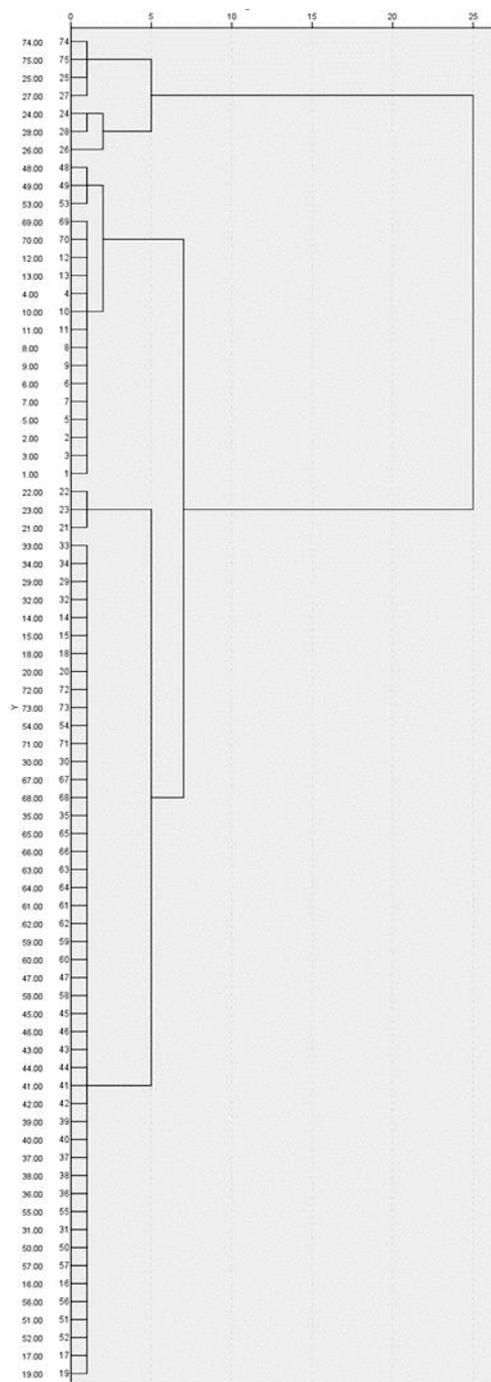


Gráfico 3. Dendrograma de grupos similares en clima por medio de SPSS.

3.3.2. Compuestos fenólicos, flavonoides y antioxidantes

Se observaron diferencias entre las muestras de las variedades de *Opuntia ficus-indica* de la localidad Adana, donde se registró una concentración de ácido cafeico de 0.912 mg/ml, al igual que en Iskenderum, mientras que en Alanya esta cifra fue significativamente menor, con 0.103 mg/ml. Por el contrario, el ácido gálico 3-O-galato mostró una concentración más alta en Alanya (844.91 mg/ml) en comparación con Adana (824.07 mg/ml).

La variedad de Fethiye muestra el contenido más alto de rutina, un flavonoide con propiedades antioxidantes, con un valor de 24.025 mg/kg, seguida de cerca por Anamur con 19.107 mg/kg y luego Iskenderum con 13.946 mg/kg. Las diferencias en el contenido fenológico total y los valores de eliminación de radicales libres probablemente se deben al color de la fruta, ubicaciones, clima, estructura del suelo y condiciones ambientales, como mencionan Belviranlı *et al.* (2019).

En el contenido de vitamina C, se observa una diferencia notable entre las variedades, con la variedad de Anamur mostrando el contenido más alto de vitamina C con 130.76 mg/100g, seguida por Fethiye con 54.2 mg/100g e Iskenderum con 40.93 mg/100g. Esta variación podría atribuirse a diferencias en las condiciones climáticas durante el crecimiento de las frutas, así como a la genética de cada variedad (Arba *et al.*, 2022).

Además, una variedad de *Opuntia*, como lo es *O. ficus barbárica* presentó características en el jugo de pulpa del fruto recolectado en la localidad de Berger, Turquía, dentro del trabajo de Juhaimi *et al.*, (2020), concentraciones significativas de compuestos fenólicos como 1,2-Dihydroxybenzene (8.78 mg/ml) y ácido siríngico (6.95 mg/ml).

3.3.3. Ácidos grasos

Los ácidos grasos fueron reportados únicamente en las semillas, donde se observan similitudes en la composición entre tres variedades, con predominio de ácidos grasos insaturados como el oleico y el linoleico. Sin embargo, la variedad de Iskenderum muestra un contenido ligeramente más alto de ácido oleico en comparación con Anamur y Fethiye. Esto podría deberse a factores genéticos específicos de la variedad cultivada en Iskenderum o a condiciones de crecimiento que favorecen la biosíntesis de este ácido graso en particular, por ejemplo, de las 3 localidades de origen de las variedades, Iskenderum presenta la menor de las precipitaciones, con una diferencia de 150 mm a la siguiente más seca, que vendría siendo Anamur.

Adicionalmente, Adana presentó una concentración de ácido palmítico de 11.69 mg/ml, mientras que Alanya mostró una cantidad ligeramente inferior, con 11.22 mg/ml.

Según Juhaimi *et al.* (2020), las semillas de *Opuntia ficus barbárica* extraídas mostraron contenidos de ácido palmítico (12.09 mg/ml) y ácido oleico (28.51 mg/ml), así como una cantidad importante de aceites totales (3.09 mg/ml). Datos no muy lejanos a los que ofrece *Opuntia ficus-indica* (OFI).

3.4. Características de los frutos en el grupo 2

En el Grupo 2 existen 4 autores distintos que trabajaron bajo caracteres climáticos similares, los cuales son Amaya-Cruz *et al.* 2019), Zegbe & Serna-Pérez (2018), Dehbi *et al.* (2014) y De Wit *et al.* (2020). Sin embargo, no es posible comparar directamente sus datos debido a que cada estudio reporta diferentes aspectos químicos y/o físicos de los frutos. Aun así, se reportan los datos disponibles de cada estudio, a pesar de la falta de uniformidad.

3.4.1. Características extraídas de la cáscara Tamaño, peso, grosor y firmeza

La variedad nombrada Khouribga amarilla presentó un peso de 41.3 g siendo esta ligeramente menor que su contraparte Khouribga roja con 41.7 g (siendo el lugar de origen del material vegetal lo que las empareja con el mismo nombre). La variedad Ras Elain mostró un peso de cáscara de 37 g, siendo la más ligera en este aspecto (Dehbi *et al.*, 2014). Por otro lado, de las Smooth red reportadas por Zegbe & Serna-Pérez (2018) aquella recolectada en 2005 tuvo un peso de cáscara de 44.2 g, mientras que Smooth red del 2006 mostró un incremento significativo alcanzando los 61.9 g, lo que indica una considerable variabilidad en esta característica entre los años de recolección que pudieron señalar los autores (Dehbi *et al.*, 2014). En relación con el espesor de la cáscara y firmeza, Amaya-Cruz *et al.* (2019), destaca que Roja Lisa presenta la cáscara más gruesa, con 0.72 mm y la mayor firmeza registrada de 3.2 kg-fuerza. En contraste, Amarillo-Naranja muestra un espesor de cáscara ligeramente inferior, con 0.66 mm y una firmeza intermedia de 2.51 kg-fuerza y finalmente, la variedad Cristalina exhibe el espesor de cáscara más delgado, con solo 0.65 mm, y la menor firmeza medida de 1.55 kg-fuerza manteniendo su forma.

3.4.2. Contenido de azúcares

En lo referente a la composición química de las cáscaras de las variedades, el contenido de azúcares únicamente reportado en el artículo de Dehbi *et al.* (2014) reporta que las variedades Khouribga amarilla, Khouribga roja y la Ras Elain contienen 154.16 mg/ml, 113.33 mg/ml y 125.13 mg/ml respectivamente de Sacarosa.

3.4.3. Contenido de antioxidantes y ácidos orgánicos

Los contenidos de ácidos orgánicos de la investigación de Amaya-Cruz *et al.* (2019) se basan en ácido gálico, ácido 2,3-hidroxibenzoico y Betacianinas para todas las variedades a excepción de la variedad Cristalina donde existe una ausencia de Betacianinas. En lo que respecta al contenido de vitamina C, la variedad Cristalina lidera con 3530 mg/100g, seguida por la Roja Lisa con 3155 mg/100g, y la Amarillo-Naranja muestra un contenido bajo respecto a las demás de esta vitamina, con 890 mg/100g.

En la comparación de las variedades de la especie OFI investigada por De Wit *et al.* (2020), se observan diferencias significativas en varios parámetros bioquímicos de relevancia. El porcentaje de inhibición de 2,2-difenil-1-picrilhidrazil (DPPH), utilizado como indicador de la capacidad antioxidante, muestra variaciones notables entre las distintas variedades frescas. El Gmino C fresco presenta una capacidad antioxidante del 91,18%, mientras que las variedades Meyers y Nepgen frescas exhiben valores superiores, alcanzando el 96,25% y el 91,67%, respectivamente. En contraste, la variedad Robusta fresca muestra un valor considerablemente menor, con un 7,44%.

En la comparación de las variedades de la especie OFI, se observan diferencias significativas en varios parámetros bioquímicos relevantes. El Gmino C fresco presenta un porcentaje de 2,2-difenil-1-picrilhidrazil (DPPH) que funciona como medidor de capacidad antioxidante de 91.18%, mientras que Meyers fresco y el Nepgen fresco exhiben valores superiores, alcanzando un 96.25% y un 91.67%, respectivamente. Por otro lado, el Robusta fresco muestra un valor relativamente bajo de 7.44%. Para la actividad quelante, el Robusta lidera con 97.32%, seguido de cerca por Meyers con un 95.2%. En contraste, el Gmino C presenta el valor más bajo en esta medida, con un 72.5%

3.4.4. Polifenoles hidrolizables

La concentración de polifenoles hidrolizables varía entre las variedades, siendo Robusta la que muestra el valor más alto de 126.82%, seguido por Meyers con 100.96%. En contraste, Gmino C y Robusta exhiben las concentraciones

más bajas de polifenoles hidrolizables, con 14.04% y 7.44%, respectivamente. Para los ácidos hidroxibenzoicos, Meyers tiene el valor más alto de 6.87%, seguido por el Robusta con 42.62%. Por otro lado, el Nepgen presenta el valor más bajo de 0.33%.

3.4.1.5. Pigmentos, Betacianinas, Betaxantinas y Caroteno

Respecto a las betacianinas y betaxantinas, el Robusta lidera en ambos compuestos, con 29.73 y 72.78 mg/kg o mg/L, respectivamente esto se puede deber a que el contenido de betacianina del zumo de fruta es el responsable del color rojo y morado (Kyriacou *et al.*, 2016), y Robusta es el único fruto de tal color, mientras que el Gmino C (cuyo color de cascara es anaranjada) muestra las concentraciones más bajas de estos compuestos. En lo que respecta al α -caroteno, el Robusta también muestra el valor más alto, con 109.46, mientras que el Gmino C presenta el valor más bajo, con 68.04, nuevamente siendo este pigmento responsable de colores rojizos en las plantas y frutos.

3.4.5. Características extraídas de los frutos en general

Los autores que pudieron reportar características generales dentro de los rangos climatológicos del grupo 2, fueron Dehbi *et al.* (2014) con 9 variedades extraídas de distintas partes de Marruecos de las cuales haremos mención de las frutas extraídas y nombradas como su lugar de Origen “Khouribga amarilla”, “Khouribga roja” y “Ras Elain” mientras que Bourhia *et al.* (2020), igualmente en Marruecos nos proporcionó datos de su estudio de dos resultados de una misma variedad nombrada a partir de ahora como “Smooth red” con distintos años de recolección (2005 y 2006).

3.4.6. Dimensiones y peso

Khouribga amarilla y la Ras Elain presentaron el mismo diámetro de 4.8 cm. Khouribga roja tuvo un mayor diámetro de 5.5 cm. No se disponen datos del diámetro del fruto para las variedades Smooth red recolectadas en 2005 y 2006. La longitud del fruto de Khouribga amarilla fue de 7.5 cm, Khouribga roja 8 cm, y la Ras Elain 7.2 cm.

El peso de fruta fresca varió considerablemente entre las variedades. Khouribga amarilla tuvo un peso de 97.4 g, mientras que Khouribga roja alcanzó los 112 g, siendo la más pesada entre las variedades estudiadas. La Ras Elain mostró un peso de 95 g cercano al de Khouribga amarilla (Dehbi *et al.*, 2014). La Smooth red recolectada en 2005 y 2006 presentó pesos de 95.7 g y 91.4 g, respectivamente, lo que sugiere una ligera disminución en el peso de fruta fresca en el año 2006 (Bourhia *et al.*, 2020).

3.4.7. Composición de la pulpa y semillas

El porcentaje de pulpa/gross fue más alto en Khouribga roja con 57.14%, seguido de cerca por la Ras Elain con 52.63% y Khouribga amarilla con 52.36%. Para el porcentaje de semilla/pulpa, Khouribga roja presentó el mayor valor con 64%, seguida de Khouribga amarilla con 51% y la Ras Elain con 50% (Dehbi *et al.*, 2014).

3.4.8. Firmeza y humedad

La firmeza del fruto mostró valores similares entre las variedades Khouribga amarilla y Khouribga roja, con 89.18 kg-fuerza y 89.13 kg-fuerza, respectivamente. La Ras Elain tuvo una firmeza ligeramente mayor de 90.81 kg-fuerza. El porcentaje de humedad varió ampliamente, con Khouribga amarilla mostrando un valor extremadamente alto de 154.16%, lo que sugiere una posible anomalía o error de medición (Dehbi *et al.*, 2014). Khouribga roja tuvo un 113.33%, la Ras Elain 125.13%, mientras que la Smooth red reportada y recolectada por Bourhia *et al.* (2020) en 2005 y 2006 presentaron valores significativamente menores de 24.7% y 32%, respectivamente.

3.4.9. Contenido de sacarosa

El contenido de sacarosa varió notablemente entre las distintas variedades. La Khouribga amarilla presentó el nivel más alto, con 154.16 mg/ml, superando a las otras dos variedades evaluadas. La Ras Elain, con 125.13 mg/ml, mostró un contenido de sacarosa menor que la Khouribga amarilla pero aún considerable. En contraste, la Khouribga roja presentó el nivel más bajo de sacarosa, con 113.33 mg/ml (Dehbi *et al.*, 2014).

3.4.10. pH

El rango de pH observado entre las muestras varía de 5.27 a 5.95, lo que indica una ligera acidez en todas las muestras evaluadas. La muestra con el pH más bajo es Ait Baamrane, con un pH de 5.27, mientras que la muestra con el pH más alto es Khouribga Amarilla, con un pH de 5.95 (Dehbi *et al.*, 2014).

3.5. Características de los frutos en el grupo 3

3.5.1. Características de los frutos

Las variedades de cáscara amarilla exhibieron diferencias significativas según los datos proporcionados por Dehbi *et al.* (2014). En cuanto al peso de la cáscara, la variedad Alkalaa presentó el peso más alto (43 g), seguida por la variedad Dukkala (47 g), mientras que Tamallalet mostró el peso de cáscara más bajo (32 g). En términos de tamaño del fruto, Ben Guerin se destacó con el mayor diámetro y longitud del fruto (5 cm y 8.1 cm, respectivamente), mientras que Alkalaa mostró el menor diámetro del fruto (4.6 cm) y Ait Baamrane la menor longitud del fruto (7 cm). Para el peso de la fruta fresca, Dukkala registró el mayor peso (109 g), mientras que Tamallalet tuvo el peso más bajo (76 g). Además, Ben Guerin [A1][NR2] mostró el mayor porcentaje de pulpa (59.22%), seguido por Ait Baamrane (54.55%), mientras que Alkalaa tuvo el menor porcentaje de pulpa (45.16%) (Dehbi *et al.*, 2014). En cuanto a la firmeza, Ben Guerin exhibió la mayor firmeza (91.18 kg-fuerza), mientras que Tamallalet mostró la menor firmeza (90.41 kg-fuerza).

3.5.2. Composición química

En lo que respecta a las características químicas, se observaron variaciones significativas entre las variedades. En los contenidos de sacarosa, Tamallalet registró el valor más alto (5.64 mg/ml), seguido por Alkalaa (5.63 mg/ml), mientras que Ait Baamrane presentó el contenido más bajo (5.27 mg/ml). En pH, Ait Baamrane exhibió el valor más alto (0.098), seguido por Dukkala (0.081), mientras que Alkalaa mostró el valor más bajo (0.049). Respecto al contenido de polifenoles hidrolizables, Ait Baamrane mostró el valor más alto (643.66 mg), seguido por Alkalaa (632.11 mg), mientras que Dukkala presentó el valor más bajo (394.9 mg) (Dehbi *et al.*, 2014).

3.5.3. Ácidos grasos en pulpa

El análisis de los ácidos grasos presentes en las variedades de pulpa de OFI analizada por Andreu *et al.* (2019) revela diferencias en su composición, por ejemplo, las frutas de pulpa naranja variedad nombrada como NT exhibieron un equilibrio entre ácidos grasos saturados y poliinsaturados, con un 39.4% y 39.3%, respectivamente. Con el ácido palmítico como el más abundante, representando un 23.5%. Por otro lado, la pulpa verde de la variedad NO se caracteriza por un alto contenido de ácidos grasos monoinsaturados (34.8%), principalmente ácido oleico. En contraste, la pulpa violeta/azul de OFI NE presenta una proporción más alta de ácidos grasos poliinsaturados (36%), con el ácido linoleico destacando en un 25.2%. La pulpa verde/naranja variedad NA muestra una alta proporción de ácidos grasos saturados (40.1%), mientras que la pulpa roja OFI FR se distingue por su contenido significativo de ácidos grasos poliinsaturados (46%). Por último, la pulpa amarilla o NJ resalta por porcentaje de ácidos grasos poliinsaturados (53.9%), especialmente el ácido linoleico, con los niveles más bajos de ácidos grasos saturados entre las variedades comparadas (20.7%).

3.5.4. Ácidos grasos en cáscara

La comparación de las características de los aceites extraídos de las cáscaras de las diferentes variedades de frutos varían como en el caso de la cáscara naranja de NT la cual exhibe una proporción equilibrada de ácidos grasos, con un 52% de poliinsaturados y una distribución cercana entre ácidos grasos saturados (25.5%) y monoinsaturados (22.5%); la cáscara verde o también nombrada NO que se caracteriza por su elevada concentración de ácidos grasos poliinsaturados (63.2%), con el ácido linoleico (42.4%) y el linolénico (20.8%) (Andreu *et al.*, 2019).

En contraste, la cáscara violeta/amarilla de NE presenta un equilibrio entre ácidos grasos saturados (32.1%) y poliinsaturados (37%), con una notable cantidad de ácido oleico (31%). La cáscara verde/naranja en OFI NA muestra una marcada predominancia de ácidos grasos poliinsaturados (61.1%), con significativas cantidades de ácido linoleico (39.2%) y linolénico (21.9%). Asimismo, la cáscara roja (FR) exhibe un perfil compuesto principalmente por ácidos grasos poliinsaturados (55.7%), como ácido linoleico (37%). Y finalmente, la cáscara amarilla de NJ presenta un contenido elevado de ácidos grasos poliinsaturados (61.5%), con el ácido linoleico (39.6%) y el linolénico (21.9%) como componentes principales (Andreu *et al.*, 2019).

3.5.5. Ácidos grasos en semilla

Las semillas del fruto de las variedades estudiadas por Andrew *et al.*, (2019) presentan un perfil de ácidos grasos particularmente rico en linoleico (59.9%), acompañado de una proporción de ácidos grasos monoinsaturados (20.1%) y saturados (15.8%).

3.6. Composición del fruto de *Opuntia* según la precipitación

La composición de los frutos de nopal varía significativamente según su color, influenciada principalmente por factores genéticos, pero también por factores ambientales y el tiempo de cosecha. Estudios han demostrado que la lluvia y la temperatura afectan el contenido de azúcares, el porcentaje de pulpa y el color del fruto (Coetzer *et al.*, 2019). En particular, la lluvia parece tener un efecto sobre los azúcares y el color del fruto, mientras que las unidades de calor acumuladas también influyen en la acidez y el pH (Coetzer *et al.*, 2019).

La caracterización de los genotipos de nopal cultivado ha revelado una amplia variación en importantes rasgos de composición, como el contenido de compuestos fenólicos, carbohidratos, pigmentos y fibra soluble/insoluble (Kyriacou *et al.*, 2016). La composición de los frutos de nopal está estrechamente relacionada con factores ambientales como la lluvia y la temperatura, así como con factores genéticos y culturales (Edvan *et al.*, 2020).

3.7 Prácticas culturales que mejoran la calidad del fruto

3.7.1. Raleo de frutos

El éxito de la producción vegetal es producir altos rendimientos de fruta de buena calidad. El parámetro de calidad del fruto más importante es el tamaño del fruto (Coetzer *et al.*, 2019). Los cultivares difieren en el tamaño del fruto, pero el entorno también puede influir en el tamaño del fruto y puede estar relacionado con la temperatura, las precipitaciones y la duración del día y la noche (Coetzer *et al.*, 2019).

El aclareo de frutos garantiza una distribución y asignación más efectiva de nutrientes entre las distintas partes de la planta, priorizando especialmente al fruto (Zegbe y Mena-Covarrubias, 2010; Coetzer *et al.*, 2019)). Cuando no se realiza el aclareo de frutos, se evidencia una competencia entre los cladodios y los frutos, así como entre los propios frutos. Una carga completa de frutos afecta negativamente la producción de cladodios, y la carga de frutos no puede compensar la disminución en la producción de cladodios (Fouché y Coetzer, 2015; Coetzer *et al.*, 2019).

Según la investigación de Arba *et al.* (2022), el raleo de frutos tuvo un efecto significativo sobre el contenido de azúcar en los frutos. Así como Varios autores también reportaron que la reducción en el número de frutos en cladodios cargados mejora la calidad de los frutos.

3.7.2. Fertilización

Al comparar los datos de la investigación de Arba *et al.* (2022), los datos del cultivar Aissa bajo diferentes tratamientos de fertilizante, específicamente los tratamientos de T2 (225-45 kg NP2O5 ha⁻¹) y T1 (150-30 kg N- P2O5 ha⁻¹) y T0 (Sin fertilización), se observan variaciones significativas en varias características de los frutos.

En primer lugar, al analizar el peso de la cáscara, evidenciaron un incremento gradual a medida que se aumenta la dosis de fertilizante. Con diferencias de pesos entre T2 (68.87 g), seguido por T1 (62.94 g), y finalmente T0 (60.89 g) de la misma forma en que aumenta el peso fresco del fruto; el número de semillas por cada 10g de pulpa se mantiene constante entre los tratamientos, con un valor de 44.18 g en todos los casos, pero; para el espesor de la cáscara, se observa un ligero aumento en los tratamientos fertilizados en comparación con el tratamiento sin fertilización, dentro de unos cuantos micrómetros. Esto nos indica que hay parámetros que la fertilización no controla como por ejemplo el número de semillas, firmeza e incluso el grosor de la cáscara significativamente.

3.7.3. Aplicación de riego

Opuntia no es una planta que requiera volúmenes de agua altos para sobrevivir, sin embargo se han estudiado su rendimiento bajo riego y sin riego, donde se pueden observar diferencias significativas en varias características de los frutos (Arba *et al.*, 2023).

El peso de la cáscara se evidencia que las plantas que fueron sometidas a riego presentan un peso de cáscara ligeramente mayor en comparación con aquellas que no recibieron riego. Por ejemplo, en la condición bajo riego se registró un peso de cáscara de 52.33 g, mientras que en la condición sin riego fue de 47.38 g. En cuanto al número de semillas por cada 10g de pulpa, la tendencia es que aquellas plantas que recibieron riego mostraron un menor número de semillas en comparación con aquellas que no fueron regadas. Por ejemplo, bajo la condición de riego se registró un número de semillas de 45.79 por cada 10g de pulpa, mientras que en la condición sin riego fue de 47.41 (Arba *et al.*, 2023). En

relación con el espesor de la cáscara, se observa que las plantas que recibieron riego tienden a presentar una cáscara ligeramente más gruesa en comparación con las que no fueron regadas. Por ejemplo, bajo riego se registró un espesor de cáscara de 4.86 mm, mientras que en la condición sin riego fue de 4.1 mm. Para el peso se observa que las plantas que fueron sometidas a riego muestran un mayor peso en comparación con aquellas que no recibieron riego. Por ello bajo riego se registró un peso de fruta fresca de 120.9 g, mientras que en la condición sin riego con de 103.4 g (Arba *et al.*, 2023).

4. Conclusiones

El cultivo del nopal exhibe una considerable variación en la composición de sus frutos, influenciada por factores genotípicos, ambientales y culturales. Factores ambientales, como la lluvia y las unidades de calor acumuladas, tienen un impacto significativo en la composición del fruto, afectando parámetros como azúcares, acidez y color. Específicamente, las precipitaciones y las temperaturas máximas antes de la cosecha son determinantes en la calidad del fruto, sugiriendo que condiciones climáticas específicas pueden mejorar la producción de frutos de mejor calidad en *Opuntia ficus*. Altas precipitaciones, por ejemplo, pueden incrementar los sólidos solubles totales, la fructosa y la acidez titulable del fruto, aunque también pueden disminuir el contenido de glucosa. En épocas de lluvias intensas, se observa un aumento en la masa del fruto y el contenido de pulpa, lo que resulta en una disminución de los sólidos solubles totales. Estos hallazgos subrayan la importancia de considerar tanto los factores genéticos como los ambientales en el manejo y mejora del cultivo de nopal.

5. Agradecimientos

Extiendo mis agradecimientos a la Subdirección de Posgrado de la FA por abrirme sus puertas y siempre ser cordiales conmigo. A mi director de tesis el Dr. Rigoberto E. Vázquez Alvarado por el apoyo brindado en todo momento, por alentarme y guiarme en este camino de preparación. Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONACHYT) por el apoyo correspondiente a la beca de maestría otorgada a N.S.R.-T. CVU: 1315830

6. Conflictos de intereses

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Referencias

1. Amaya-Cruz, D.M., Pérez-Ramírez, I.F., Delgado-García, J., Mondragón-Jacobo, C., Dector-Espinoza, A. y Reynoso-Camacho, R. (2019). An integral profile of bioactive compounds and functional properties of prickly pear (*Opuntia ficus indica* L.) peel with different tonalities. *Food Chemistry*. 278, pp. 568-578. doi: 10.1016/j.foodchem.2018.11.031.
2. Arba, M., Farhat, S. y Arba, M. (2022). Effect of fruit thinning on fruit yield and quality of cactus pear *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. in a semi-arid area. *International Journal of Science and Research Archive*. 6(1), Article 1. doi: 10.30574/ijrsra.2022.6.1.0122.
3. Arba, M., Rmili, A., Arba, M. y Rmili, A. (2023). Effect of removing the spring flush and phosphor-nitrogenous fertilizing on fruit yield and quality of the late fruiting of cactus pear *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. *International Journal of Science and Research Archive*. 10(2), Article 2. doi: 10.30574/ijrsra.2023.10.2.0876.
4. Belviranlı, B., Al-Juhaimi, F., Özcan, M.M., Ghafoor, K., Babiker, E.E. y Alsawmahi, O.N. (2019). Effect of location on some physico-chemical properties of prickly pear (*Opuntia ficus-indica* L.) fruit and seeds. *Journal of Food Processing and Preservation*. 43(3), e13896. doi: 10.1111/jfpp.13896.
5. Bourhia, M., Elmahdaoui, H., Moussa, S.I., Ullah, R. y Bari, A. (2020). Potential natural dyes food from the powder of prickly pear fruit peels (*Opuntia* spp.) growing in the Mediterranean Basin under climate stress. *BioMed Research International*. 2020, 7579430. doi: 10.1155/2020/7579430.
6. Coetzer, G.M., Fouché, H.J. y Smith, M.F. (2019). Genotype × environmental interactions of cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) in the semi-arid regions of South Africa: Fruit production. *Acta Horticulturae*. 1247, pp. 31-40. doi: 10.17660/ActaHortic.2019.1247.5.
7. De Wit, M., Du Toit, A., Osthoff, G. y Hugo, A. (2020). Antioxidant content, capacity and retention in fresh and processed cactus pear (*Opuntia ficus-indica* and *O. robusta*) fruit peels from different fruit-colored cultivars. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. 4. doi: 10.3389/fsufs.2020.00133.
8. Dehbi, F., Hasib, A., Ouattmane, A. y Elbatal, H. (2014). Physicochemical characteristics of Moroccan prickly pear juice (*Opuntia ficus indica* L.). *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. 4, pp. 300-306.
9. Edvan, R.L., Mota, R.R.M., Dias-Silva, T.P., do Nascimento, R.R., de Sousa, S.V., da Silva, A.L., Araújo, M.J. de y Araújo, J.S. (2020). Resilience of cactus pear genotypes in a tropical semi-arid region subject to climatic cultivation restriction. *Scientific Reports*. 10(1), p. 10040. doi: 10.1038/s41598-020-66972-0.

10. Juhaimi, F.A., Ghafoor, K., Uslu, N., Mohamed Ahmed, I.A., Babiker, E.E., Özcan, M.M. y Fadimu, G.J. (2020). The effect of harvest times on bioactive properties and fatty acid compositions of prickly pear (*Opuntia ficus-barbarica* A. Berger) fruits. Food Chemistry. 303, p. 125387. doi: 10.1016/j.foodchem.2019.125387.
11. Kyriacou, M.C., Emmanouilidou, M.G. y Soteriou, G.A. (2016). Asynchronous ripening behavior of cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) cultivars with respect to physicochemical and physiological attributes. Food Chemistry. 211, pp. 598-607. doi: 10.1016/j.foodchem.2016.05.113.
12. López-Zúñiga, R.S. (2022). Evaluación del efecto de materia orgánica en cultivares tuneros tolerantes a bajas temperaturas de las zonas altas del estado de Nuevo León. International Journal of Science and Research Archive.
13. Manzur-Valdespino, S., Arias-Rico, J., Ramírez-Moreno, E., Sánchez-Mata, M.D.C., Jaramillo-Morales, O.A., Angel-García, J., Zafra-Rojas, Q.Y., Barrera-Gálvez, R. y Cruz-Cansino, N.D.S. (2022). Applications and pharmacological properties of cactus pear (*Opuntia* spp.) peel: A review. Life. 12(11), p. 1903. doi: 10.3390/life12111903.
14. Rodrigues, C., Paula, C.D. de, Lahbouki, S., Meddich, A., Outzourhit, A., Rashad, M., Pari, L., Coelho, I., Fernando, A.L. y Souza, V.G.L. (2023). *Opuntia* spp.: An overview of the bioactive profile and food applications of this versatile crop adapted to arid lands. Foods. 12(7), p. 1465. doi: 10.3390/foods12071465.
15. Zegbe, J.A. y Serna-Pérez, A. (2018). Irrigation options to save water while enhancing export-size fruit and storability of 'Smooth IORed' cactus pear. Journal of the Science of Food and Agriculture. 98(14), pp. 5503-5508. doi: 10.1002/jsfa.9096.

Descargo de responsabilidad/Nota del editor: Las declaraciones, opiniones y datos contenidos en todas las publicaciones son responsabilidad exclusiva de los autores y colaboradores individuales y no de SAV y/o el/lo editor/es declinan toda responsabilidad por daños personales o materiales derivados de ideas, métodos, instrucciones o productos a los que se haga referencia en el contenido.

Cita: Vázquez-Alvarado, R. E., Olivares-Sáenz, E., Ojeda-Zacarías, M. del C., Aguirre-Arzola, V. E., Elizondo-Luévano, J. H. y Ramírez, N. (2024) «Impacto de los Factores Abióticos en las Propiedades Físico-químicas del Fruto de *Opuntia* spp.», *Scientia Agricolis Vita*, 1(3):15-25. <https://agricolis.uanl.mx/index.php/revista/article/view/13> (Accedido: 13 septiembre 2024).

Editor Académico: Iosvany López-Sandin

Recibido: 12-06-2024

Revisado: 24-06-2024

Aceptado: 03-09-2024

Publicado: 17-09-2024



Copyright: © 2023 por los autores. Presentado para su posible publicación en acceso abierto bajo los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).