



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

Caracterización de tunas (*Opuntia* spp.) del Valle de Teotihuacán y del Altiplano Mexicano: parámetros físicos, fisicoquímicos y perfil sensorial

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
QUÍMICO DE ALIMENTOS

P R E S E N T A

ALEJANDRO OROS TÉLLEZ



C.U., Cd. Mx.

2023



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE:	Profa. Gálvez Mariscal María Amanda
VOCAL:	Profa. Severiano Pérez Patricia
SECRETARIO:	Profa. Elias Patiño Ana Karina
1^{er} SUPLENTE:	Profa. Ríos Díaz Sandra Teresita
2^{do} SUPLENTE:	Prof. Aguilar Osorio José Guillermo de Jesús

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

Laboratorio de Evaluación Sensorial, Anexo del Laboratorio 4D, Edificio A, Cuarto Piso, Facultad de Química, Ciudad Universitaria, UNAM, Coyoacán, Ciudad de México, México.

Este trabajo se realizó con el presupuesto del financiamiento PAIP No. 5000-9089 e ingresos extraordinarios del Laboratorio de Evaluación Sensorial de la Facultad de Química, UNAM.

Dra. Patricia Severiano Pérez

Asesora

Alejandro Oros Téllez

Sustentante

AGRADECIMIENTOS

Académicos

A todos los alumnos de servicio social (apoyo técnico y jueces) estancia y tesis, particularmente a Jon, Pau, Lau, Karla, Monse, Pao, Joe, Miguel, Melanie, Dieguito, Carla y Jessica, por su compromiso y arduo trabajo llevado a cabo durante el transcurso de este proyecto por todo el apoyo recibido de su parte, así como de todos los demás proyectos en los que tuve la fortuna de participar.

A la Dra. Patricia Severiano Pérez por su gran apoyo y soporte este último año y medio en distintos ámbitos, paciencia durante el desarrollo de este proyecto, su notable interés por el bienestar e intereses de sus alumnos, motivándome, y mostrándome lo interesante y bonita que es la Evaluación Sensorial.

A la Facultad de Química y al Laboratorio de Evaluación Sensorial por el conocimiento brindado durante mi estancia en todo este tiempo, así como por el espacio y la posibilidad para mis estudios y realizar este proyecto.

Al Dr. Oswaldo Pérez Anguiano, por sus consejos y apoyo en diversos temas, así como sugerencias, su iniciativa para la realización de este proyecto, por su interés y atención con el tema, revisiones, y especialmente por su gran ayuda visitando a distintos productores en los estados de origen de las muestras analizadas encargándose también del envío de dichas muestras.

Al Laboratorio de Bromatología del Departamento de Nutrición Animal y Bioquímica de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la UNAM, por el apoyo con los análisis fisicoquímicos realizados a las muestras de tuna, con sus dificultades.

A la Dra. Amanda Gálvez y a la profa. Karina Elias por la revisión y comentarios brindados para esta tesis, así como por haber tenido la fortuna de recibir clases por parte de ustedes.

A mi casa de estudios, la Universidad Nacional Autónoma de México, por brindarme el conocimiento y las herramientas, durante estos casi 9 años de pertenencia, para ser capaz de encarar los retos que me presente la vida.

Personales

A mi madre y mi padre, Eugenia Téllez y Francisco Oros, respectivamente, por ser el principal soporte en mi vida, criarme y acompañarme en las buenas y en las malas, siendo un ejemplo y enseñarme un sinfín de cosas, por su apoyo, trabajo duro, y por su amor incondicional.

A mi hermano y mi primo, Carlos y Juan, respectivamente, mis compañeros de juegos en la infancia, por todo su apoyo, así como enseñarme muchas cosas (incluyendo mañas) y, a pesar de todas las peleas o desacuerdos, ser una inspiración para la vida y motivación para superarme.

A mis amigos más cercanos (y mi otra familia), Toño (*Antuño*), Sofi (*Chofas*), Chava, Dani, Nic, Estefi (*Fefis*), Gerardo, Karen, Vlado, Joan, Uri, por todos los momentos que hemos pasado a lo largo de los años, su apoyo en momentos difíciles, por los consejos y ayuda, por los momentos felices y divertidos, y por haber coincidido en esta vida con ustedes.

A mis gatitos, *Fulano* y *Anvorguesa*, quienes me acompañaron en momentos complicados, dándome de su calor, momentos divertidos y amor.

A todas las demás personas que puedo considerar amigos, con quienes tuve la suerte de conocer durante estos años, coincidiendo con ellos en distintas

*“How happy is the blameless vestal’s lot!
The world forgetting, by the world forgot.
Eternal sunshine of the spotless mind!
Each pray’r accepted, and each wish resign’d [...].”*

Alexander Pope

ÍNDICE DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
2. MARCO TEÓRICO	4
2.1. Tuna (<i>Opuntia</i> spp.)	4
2.1.1. Definición	4
2.1.2. Fisiología	4
2.1.3. Ecofisiología	6
2.1.3.1. Frutos no climatéricos	9
2.1.4. Características físicas y fisicoquímicas de variedades de tuna	10
2.1.5. Producción	16
2.2. Composición química	17
2.2.1. Humedad/agua y materia seca	17
2.2.2. Carbohidratos	17
2.2.2.1. Azúcares reductores	17
2.2.2.2. Polisacáridos y fibra	18
2.2.3. Sólidos solubles	19
2.2.4. Lípidos	20
2.2.5. Proteína	21
2.2.6. Vitaminas	22
2.2.6.1. Vitamina C	23
2.2.7. Minerales y cenizas	24
2.3. Acidez titulable y pH	25
2.4. Pigmentos y antioxidantes	27
2.4.1. Betalaínas	31
2.4.2. Carotenoides	33
2.4.3. Clorofila	36
2.4.4. Compuestos fenólicos	38
2.4.4.1. Flavonoides	39
2.5. Análisis instrumental de color	41
2.6. Análisis instrumental de textura	44
2.6.1. Punción	46
2.6.2. Prueba de corte (“Shear test”)	47
2.7. Evaluación sensorial	48
2.7.1. Metodologías sensoriales	49

2.7.1.1. Metodologías analíticas	50
2.7.1.1.1. Perfil Flash (Flash Profile).....	51
2.8. Análisis de Procrustes Generalizado.....	53
2.9. Análisis Factorial Múltiple	55
3. OBJETIVOS	56
3.1. Objetivo General.....	56
3.2. Objetivos Particulares	56
4. HIPÓTESIS.....	56
5. MATERIALES Y MÉTODOS.....	56
5.1. Materiales.....	57
5.2. Diagrama general	59
5.3. Análisis físicos.....	60
5.4. Colorimetría	62
5.5. Evaluación instrumental de textura.....	64
5.6. Determinación de pH y acidez titulable.....	65
5.7. Análisis Químico Proximal.....	66
5.8. Cuantificación de azúcares reductores.....	67
5.9. Determinación de sólidos solubles	68
5.10. Cuantificación de vitamina C	69
5.11. Cuantificación de minerales.....	70
5.12. Cuantificación de betalaínas	70
5.13. Cuantificación de clorofila y carotenos	71
5.14. Cuantificación de flavonoides	71
5.15. Cuantificación de fenoles totales	72
5.16. Determinación de la capacidad antioxidante	73
5.17. Evaluación sensorial	74
5.18. Análisis estadístico	76
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	77
6.1. Composición química, minerales y parámetros fisicoquímicos	77
6.1.1. Composición Química.....	77
6.1.1.1. Humedad y materia seca.....	77
6.1.1.2. Proteína Cruda	78
6.1.1.3. Grasa Cruda	80
6.1.1.4. Fibra Cruda.....	81

6.1.1.5. Cenizas	82
6.1.1.6. ELN	83
6.1.2. Perfil de minerales.....	86
6.1.2.1. Calcio.....	86
6.1.2.2. Potasio	87
6.1.2.3. Zinc.....	88
6.1.2.4. Fósforo.....	89
6.1.2.5. Hierro.....	90
6.1.2.6. Selenio	91
6.1.2.7. Cobre	92
6.1.3. Parámetros fisicoquímicos	95
6.1.3.1. Sólidos solubles.....	95
6.1.3.2. pH	97
6.1.3.3. Acidez titulable.....	98
6.1.3.4. Azúcares reductores.....	99
6.1.3.5. Vitamina C.....	101
6.2. Pigmentos, polifenoles y capacidad antioxidante	104
6.2.1. Pigmentos	104
6.2.1.1. Betalaínas	104
6.2.1.1.1. Betaxantinas.....	104
6.2.1.1.2. Betacianinas	105
6.2.1.2. Clorofila.....	107
6.2.1.3. Carotenos	108
6.2.2. Polifenoles y capacidad antioxidante	110
6.2.2.1. Flavonoides.....	110
6.2.2.2. Fenoles Totales.....	110
6.2.2.3. Capacidad antioxidante.....	112
6.3. Dimensiones y peso	114
6.3.1. Dimensiones	114
6.3.1.1. Fruto entero	114
6.3.1.2. Cáscara	116
6.3.1.3. Pulpa.....	117
6.3.2. Peso	121
6.3.2.1. Fruto entero	121
6.3.2.2. Cáscara	123

6.3.2.3. Pulpa	125
6.3.2.4. Semillas	127
6.4. Color instrumental	130
6.5. Textura instrumental	140
6.6. Análisis sensorial	142
6.6.1. Generación de atributos	142
6.6.2. Perfil sensorial	143
6.6.2.1. Análisis completo	144
6.6.2.1.1. Apariencia y textura	144
6.6.2.1.2. Olor, sabor y resabio	147
6.6.2.2. Análisis por región de origen	150
6.6.2.2.1. Valle de Teotihuacán	150
6.6.2.2.1.1. Apariencia y textura	150
6.6.2.2.1.2. Olor, sabor y resabio	152
6.6.2.2.2. Altiplano Mexicano	156
6.6.2.2.2.1. Apariencia y textura	156
6.6.2.2.2.2. Olor, sabor y resabio	158
6.7. Correlación entre atributos sensoriales, parámetros instrumentales, físicos y fisicoquímicos	162
7. CONCLUSIONES	167
8. PERSPECTIVAS	170
9. REFERENCIAS	171
10. ANEXOS	193

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1.	Macrocomponentes y contenido de azúcares reductores en variedades de tuna (<i>Opuntia</i> spp.) del Altiplano Mexicano y del Valle de Teotihuacán, en base seca (g/100 g bs).....	193
Anexo 2.	Perfil de minerales (mg/kg) presentes en pulpa de variedades de tuna (<i>Opuntia</i> spp.) del Altiplano Mexicano y del Valle de Teotihuacán.....	194
Anexo 3.	Perfil de minerales en base seca (mg/100 g bs) presentes en pulpa de variedades de tuna (<i>Opuntia</i> spp.) del Altiplano Mexicano y del Valle de Teotihuacán.....	195
Anexo 4.	Dimensiones (mm) de variedades de tuna (<i>Opuntia</i> spp.) del Altiplano Mexicano y del Valle de Teotihuacán, en fruto entera (con cáscara), grosor de la cáscara, y dimensiones de la pulpa (sin cáscara).....	196
Anexo 5.	Capacidad antioxidante, base seca, en pulpa de tunas (<i>Opuntia</i> spp.) del Altiplano Mexicano y del Valle de Teotihuacán, en mg EAA/g bs.....	197
Anexo 6.	Ejemplo de forma de evaluación presentada ante los jueces durante la realización del perfil flash de las muestras de tuna (<i>Opuntia</i> spp.) del Altiplano Mexicano y del Valle de Teotihuacán, en el Laboratorio de Investigación de Evaluación Sensorial.....	198
Anexo 7.	Ejemplo de cuestionario de perfil flash de muestras de tuna (<i>Opuntia</i> spp.) del Altiplano Mexicano y del Valle de Teotihuacán, elaborado en Fizz Acquisition presentado ante los jueces en el Laboratorio de Investigación de Evaluación Sensorial.....	200
Anexo 8.	Fotografías de tuna Reyna 1 (<i>Opuntia albicarpa</i> Sheinvar) analizada del Valle de Teotihuacán en el Laboratorio de Investigación de Evaluación Sensorial.....	205
Anexo 9.	Fotografías de tuna Cristalina (<i>Opuntia albicarpa</i> Sheinvar) analizada del Altiplano Mexicano en el Laboratorio de Investigación de Evaluación Sensorial.....	206
Anexo 10.	Fotografías de tuna Amarilla Montesa (<i>Opuntia megacantha</i>) analizada del Altiplano Mexicano en el Laboratorio de Investigación de Evaluación Sensorial.....	207
Anexo 11.	Fotografías de tuna Amarilla Venado (<i>Opuntia megacantha</i>) analizada del Altiplano Mexicano en el Laboratorio de Investigación de Evaluación Sensorial.....	208
Anexo 12.	Fotografías de tuna Pico Chulo (<i>Opuntia megacantha</i>) analizada del Valle de Teotihuacán en el Laboratorio de Investigación de Evaluación Sensorial....	209

Anexo 13.	Fotografías de tuna Cardona (<i>Opuntia streptacantha</i>) analizada del Altiplano Mexicano en el Laboratorio de Investigación de Evaluación Sensorial.	210
Anexo 14.	Fotografías de tuna Reyna 2 (<i>Opuntia albicarpa</i> Sheinvar) analizada del Valle de Teotihuacán en el Laboratorio de Investigación de Evaluación Sensorial.	211
Anexo 15.	Fotografías de tuna Roja San Martín (<i>Opuntia megacantha</i>) analizada del Valle de Teotihuacán en el Laboratorio de Investigación de Evaluación Sensorial.	212
Anexo 16.	Fotografías de tuna Amarilla Miquihuana (<i>Opuntia lasciacantha</i>) analizada del Altiplano Mexicano en el Laboratorio de Investigación de Evaluación Sensorial.	213
Anexo 17.	Fotografías de tuna Amarillo Plátano (<i>Opuntia megacantha</i>) analizada del Valle de Teotihuacán en el Laboratorio de Investigación de Evaluación Sensorial.	214
Anexo 18.	Fotografías de tuna Roja Pelona (<i>Opuntia ficus-indica</i> L.) analizada del Altiplano Mexicano en el Laboratorio de Investigación de Evaluación Sensorial.	215
Anexo 19.	Fotografías de tuna “Naranjona” (<i>Opuntia megacantha</i>) analizada del Altiplano Mexicano en el Laboratorio de Investigación de Evaluación Sensorial.	216
Anexo 20.	Fotografías de tuna Charola (<i>Opuntia streptacantha</i>) analizada del Altiplano Mexicano en el Laboratorio de Investigación de Evaluación Sensorial.	217

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1.	Parámetro Chroma (C^*) del color.....	62
Ecuación 2.	Parámetro hue o matiz (h) del color, en el cuadrante I del plano a-b.	62
Ecuación 3.	Parámetro hue o matiz (h) del color, en los cuadrantes II y III del plano a-b.	62
Ecuación 4.	Diferencia entre dos colores (ΔE^*_{ab}) en el espacio de color del sistema CIEL $*a^*b^*$	63
Ecuación 5.	Contenido de materia seca (% MS) en muestra (base húmeda).....	66
Ecuación 6.	Contenido del ELN en muestra (base húmeda).	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Estructura química de los grupos, a) aldehído (reductor), b) hemiacetal (reductor, forma cíclica en carbohidratos), c) acetal (reductor), d) cetona (no reductor), e) hemicetal (no reductor, forma cíclica en carbohidratos), y f) cetal (no reductor).....	18
Figura 2.	Estructura química de los vitámeros de la vitamina C, a) ácido L-ascórbico (forma reducida), y b) ácido L-deshidroascórbico (forma oxidada).....	23
Figura 3.	Estructura química de ácidos orgánicos más comúnmente presentes en alimentos, a) ácido cítrico (H_3Cit), b) ácido acético (HAc), c) ácido L-láctico ($HLac$), d) ácido L-tartárico (H_2Tar), e) ácido L-málico (H_2Mal), f) ácido carbónico (H_2CO_3), y g) ácido fosfórico (H_3PO_4).....	26
Figura 4.	Mecanismo de la reacción en cadena clásica de radicales en la oxidación lipídica (lipooxidación) con propagación mediante una serie de abstracciones de hidrógeno.....	29
Figura 5.	Mecanismo general de acción de antioxidantes primarios, interrumpiendo la cadena de propagación radicalaria.....	29
Figura 6.	Estructura química de algunas betacianinas, a) betanidina ($R = OH$), betanina ($R = Glucosa$), e amarantina [$R = (\text{ácido } 2'\text{-glucurónicil)glucosa}$]; y b) isobetanidina ($R = OH$), isobetanina ($R = Glucosa$), e isoamarantina [$R = (\text{ácido } 2'\text{-glucurónicil)glucosa}$].....	32
Figura 7.	Estructura química de algunas betaxantinas, a) indicaxantina; y b) vulgaxantina-I ($R = NH_2$), y vulgaxantina-II ($R = OH$).....	33
Figura 8.	Estructura química de algunos carotenos, a) α -caroteno, b) β -caroteno, c) γ -caroteno y d) licopeno.....	34
Figura 9.	Estructura química de algunas xantofilas, a) β -criptoxantina, b) cantaxantina, c) β -apo-8'-carotenal, d) luteína, e) neoxantina y f) violaxantina.....	35
Figura 10.	Estructura química de la clorofila a) clorofila a ($R = CH_3$) y clorofila b ($R = CHO$); b) clorofilida; y c) fitol.....	37
Figura 11.	Estructura química básica de los flavonoides.....	39
Figura 12.	Estructura química de algunos flavonoides (agliconas): a) flavano (catequina), b) flavonol (quercetina), c) flavona (diosmetina), y d) antocianidina (cianidina).....	40
Figura 13.	Diagrama tridimensional del espacio CIELab del color.....	42
Figura 14.	Diagrama del sistema CIELab mostrando solamente el plano a-b.....	42
Figura 15.	Diagrama a color del sistema CIEL*a*b* mostrando solamente el plano a-b.....	43

Figura 16.	Clasificación general de las metodologías sensoriales.....	49
Figura 17.	Transformaciones realizadas al conjunto de datos mediante el GPA.	54
Figura 18.	Diagrama general de estrategia experimental.	59
Figura 19.	Dimensiones medidas en fruto completo: (a) eje polar, y (b) eje ecuatorial mayor (b₁) y eje ecuatorial menor (b₂) , de tuna (<i>Opuntia</i> spp.) del Altiplano Mexicano y del Valle de Teotihuacán.	60
Figura 20.	Dimensiones medidas en cáscara y pulpa: (a) grosor de cáscara, (b) eje polar, y (c) eje ecuatorial mayor (c₁) y eje ecuatorial menor (c₂) , de tuna (<i>Opuntia</i> spp.) del Altiplano Mexicano y del Valle de Teotihuacán.	60
Figura 21.	Proceso de determinación de semillas en peso de tunas (<i>Opuntia</i> spp.) del Altiplano Mexicano y del Valle de Teotihuacán: (a) licuado, (b) colado, (c) distribución, y (d) pesado.....	61
Figura 22.	Evaluación de color instrumental de tuna (<i>Opuntia</i> spp.) del Altiplano Mexicano y del Valle de Teotihuacán, en (a) cáscara externa, (b) cáscara interna, y (c) pulpa.	63
Figura 23.	Acomodo de sonda para punción y tuna (<i>Opuntia</i> spp.) del Altiplano Mexicano y del Valle de Teotihuacán para evaluación instrumental de textura en pulpa.	64
Figura 24.	Acomodo de celda Kramer con cuchillas (5) y tuna (<i>Opuntia</i> spp.) del Altiplano Mexicano y del Valle de Teotihuacán para evaluación instrumental de textura en pulpa.	64
Figura 25.	Evaluación de sólidos solubles en jugo de tuna (<i>Opuntia</i> spp.) del Altiplano Mexicano y del Valle de Teotihuacán.	68
Figura 26.	Evaluación sensorial de tuna (<i>Opuntia</i> spp.) en el Laboratorio de Evaluación Sensorial, Facultad de Química, UNAM.	74
Figura 27.	Evaluación del PF de tuna (<i>Opuntia</i> spp.) en el Laboratorio de Evaluación Sensorial, Facultad de Química, UNAM.	75
Figura 28.	PCA de atributos de Aspecto (●) y Textura (●) de las variedades de tuna (<i>Opuntia</i> spp.) provenientes del Valle de Teotihuacán (Reyna 1, Reyna 2, Pico Chulo, Roja San Martín, Amarillo Plátano; ●) y del Altiplano Mexicano (Cristalina, Amarilla Montesa, Amarilla Venado, Cardona, Roja Pelona, “Naranja”, Charola, Amarilla Miquihuana; ●), obtenido por GPA.	145
Figura 29.	Correlación entre las dimensiones de la configuración del consenso inicial de los jueces y las variedades de tuna (<i>Opuntia</i> spp.) provenientes del Valle de Teotihuacán (Reyna 1, Reyna 2, Pico Chulo, Roja San Martín, Amarillo Plátano; ●) y del Altiplano Mexicano (Cristalina, Amarilla Montesa, Amarilla Venado, Cardona, Roja Pelona, “Naranja”, Charola, Amarilla Miquihuana; ●) para los atributos de apariencia y textura.	146

- Figura 30.** PCA de atributos de Olor (●), Sabor (●) y Resabio (●) de las variedades de tuna (*Opuntia* spp.) provenientes del Valle de Teotihuacán (Reyna 1, Reyna 2, Pico Chulo, Roja San Martín, Amarillo Plátano; ●) y del Altiplano Mexicano (Cristalina, Amarilla Montesa, Amarilla Venado, Cardona, Roja Pelona, “Naranjona”, Charola, Amarilla Miquihuana; ●), obtenido por GPA. 148
- Figura 31.** Correlación entre las dimensiones de la configuración del consenso inicial de los jueces y las variedades de tuna (*Opuntia* spp.) provenientes del Valle de Teotihuacán (Reyna 1, Reyna 2, Pico Chulo, Roja San Martín, Amarillo Plátano; ●) y del Altiplano Mexicano (Cristalina, Amarilla Montesa, Amarilla Venado, Cardona, Roja Pelona, “Naranjona”, Charola, Amarilla Miquihuana; ●) para los atributos de olor, sabor y resabio. 149
- Figura 32.** PCA de atributos de aspecto (●) y Textura (●) de las variedades de tuna (*Opuntia* spp.) provenientes del Valle de Teotihuacán (Reyna 1, Reyna 2, Pico Chulo, Roja San Martín, Amarillo Plátano; ●), obtenido por GPA. 151
- Figura 33.** Correlación entre las dimensiones de la configuración del consenso inicial de los jueces y las variedades de tuna (*Opuntia* spp.) provenientes del Valle de Teotihuacán (Reyna 1, Reyna 2, Pico Chulo, Roja San Martín, Amarillo Plátano; ●) para los atributos de apariencia y textura. 152
- Figura 34.** PCA de atributos de Olor (●), Sabor (●) y Resabio (●) de las variedades de tuna (*Opuntia* spp.) provenientes del Valle de Teotihuacán (Reyna 1, Reyna 2, Pico Chulo, Roja San Martín, Amarillo Plátano; ●), obtenido por GPA. 154
- Figura 35.** Correlación entre las dimensiones de la configuración del consenso inicial de los jueces y las variedades de tuna (*Opuntia* spp.) provenientes del Valle de Teotihuacán (Reyna 1, Reyna 2, Pico Chulo, Roja San Martín, Amarillo Plátano; ●) para los atributos de de olor, sabor y resabio. 155
- Figura 36.** PCA de atributos de Aspecto (●) y Textura (●) de las variedades de tuna (*Opuntia* spp.) originarias del Altiplano Mexicano (Cristalina, Amarilla Montesa, Amarilla Venado, Cardona, Roja Pelona, “Naranjona”, Charola, Amarilla Miquihuana; ●), obtenido por GPA. 157
- Figura 37.** Correlación entre las dimensiones de la configuración del consenso inicial de los jueces y las variedades de tuna (*Opuntia* spp.) originarias del Altiplano Mexicano (Cristalina, Amarilla Montesa, Amarilla Venado, Cardona, Roja Pelona, “Naranjona”, Charola, Amarilla Miquihuana; ●) para los atributos de apariencia y textura. 158
- Figura 38.** PCA de atributos de Olor (●), Sabor (●) y Resabio (●) de las variedades de tuna (*Opuntia* spp.) originaria del Altiplano Mexicano (Cristalina, Amarilla Montesa, Amarilla Venado, Cardona, Roja Pelona, “Naranjona”, Charola, Amarilla Miquihuana; ●), obtenido por GPA. 160

- Figura 39.** Correlación entre las dimensiones de la configuración del consenso inicial de los jueces y las variedades de tuna (*Opuntia* spp.) originaria del Altiplano Mexicano (Cristalina, Amarilla Montesa, Amarilla Venado, Cardona, Roja Pelona, “Naranjona”, Charola, Amarilla Miquihuana; ●) para los atributos de olor, sabor y resabio. 161
- Figura 40.** MFA de atributos sensoriales (apariencia, O Olor, S Sabor, R Resabio, TEXTURA), parámetros físicos (dimensiones, peso, porcentajes), fisicoquímicos (Proximal, AQP bs, fisicoquímico, minerales, pigmentos y polifenoles), y parámetros de color y textura instrumentales en tuna (*Opuntia* spp.) del Valle de Teotihuacán (●) y del Altiplano Mexicano (●)..... 166

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Muestras de tuna (<i>Opuntia</i> spp.) analizadas del Altiplano Mexicano y del Valle de Teotihuacán.....	3
Tabla 2.	Condiciones climatológicas de los estados y localidades de origen de las muestras de tuna (<i>Opuntia</i> spp.) analizadas del Altiplano Mexicano y del Valle de Teotihuacán.....	8
Tabla 3.	Algunos estudios realizados en distintas variedades de tuna (<i>Opuntia</i> spp.)..	14
Tabla 4.	Producción agrícola (ton) de frutos, modalidades de riego y temporal a nivel nacional en México, 2022.	16
Tabla 5.	Datos de origen de muestras de tuna (<i>Opuntia</i> spp.) analizadas del Altiplano Mexicano y del Valle de Teotihuacán, así como diferenciación general por color de pulpa y cáscara.	57
Tabla 6.	Lista de jueces entrenados que participaron como evaluadores para la metodología del perfil flash de tunas (<i>Opuntia</i> spp.) del Altiplano Mexicano y del Valle de Teotihuacán.....	58
Tabla 7.	Composición química de variedades de tuna (<i>Opuntia</i> spp.) del Altiplano Mexicano y del Valle de Teotihuacán, en base húmeda (g/100 g _{bh}).....	85
Tabla 8.	Perfil de minerales (mg/100 g) presentes en pulpa de variedades de tuna (<i>Opuntia</i> spp.) del Altiplano Mexicano y del Valle de Teotihuacán.	94
Tabla 9.	Parámetros fisicoquímicos en pulpa de variedades de tuna (<i>Opuntia</i> spp.) del Altiplano Mexicano y del Valle de Teotihuacán.....	103
Tabla 10.	Pigmentos (betalaínas, clorofila y carotenos) en pulpa de variedades de tuna (<i>Opuntia</i> spp.) del Altiplano Mexicano y del Valle de Teotihuacán.	109
Tabla 11.	Polifenoles y capacidad antioxidante en pulpa de variedades de tuna (<i>Opuntia</i> spp.) del Altiplano Mexicano y del Valle de Teotihuacán.....	113
Tabla 12.	Dimensiones (cm) de variedades de tuna (<i>Opuntia</i> spp.) del Altiplano Mexicano y del Valle de Teotihuacán, en fruto entera (con cáscara), grosor de la cáscara, y dimensiones de la pulpa (sin cáscara).	120
Tabla 13.	Peso (g) de variedades de tuna (<i>Opuntia</i> spp.) del Altiplano Mexicano y del Valle de Teotihuacán, de fruto entero y sus principales constituyentes físicos (cáscara, pulpa y semillas).	129
Tabla 14.	Porcentajes (%) de las partes físicas principales constituyentes de variedades de tuna (<i>Opuntia</i> spp.) del Altiplano Mexicano y del Valle de Teotihuacán: cáscara, pulpa con y sin semillas, y semillas.....	129

Tabla 15.	Color instrumental en el espacio CIEL*a*b* en la cara externa de cáscara de variedades de tuna (<i>Opuntia</i> spp.) del Altiplano Mexicano y del Valle de Teotihuacán.	131
Tabla 16.	Color instrumental en el espacio CIEL*a*b* en la cara interna de cáscara de variedades de tuna (<i>Opuntia</i> spp.) del Altiplano Mexicano y del Valle de Teotihuacán.	132
Tabla 17.	Color instrumental en el espacio CIEL*a*b* en la pulpa de variedades de tuna (<i>Opuntia</i> spp.) del Altiplano Mexicano y del Valle de Teotihuacán.	133
Tabla 18.	Matriz de diferencias de ΔE^*_{ab} del color en la cáscara externa entre las variedades de tuna (<i>Opuntia</i> spp.) del Altiplano Mexicano y del Valle de Teotihuacán.	135
Tabla 19.	Matriz de diferencias de ΔE^*_{ab} del color en la cáscara interna entre las variedades de tuna (<i>Opuntia</i> spp.) del Altiplano Mexicano y del Valle de Teotihuacán.	137
Tabla 20.	Matriz de diferencias de ΔE^*_{ab} del color en la pulpa entre las variedades de tuna (<i>Opuntia</i> spp.) del Altiplano Mexicano y del Valle de Teotihuacán.....	139
Tabla 21.	Evaluación instrumental de textura de variedades de tuna (<i>Opuntia</i> spp.) del Altiplano Mexicano y del Valle de Teotihuacán.....	141
Tabla 22.	Atributos sensoriales generados para variedades de tuna (<i>Opuntia</i> spp.) del Altiplano Mexicano y del Valle de Teotihuacán.....	142
Tabla 23.	Escalas de evaluación utilizada para los atributos de apariencia en pulpa de tuna (<i>Opuntia</i> spp.) del Altiplano Mexicano y del Valle de Teotihuacán.....	143
Tabla 24.	Escalas de evaluación utilizada para los atributos de textura en pulpa de tuna (<i>Opuntia</i> spp.) del Altiplano Mexicano y del Valle de Teotihuacán.	144

1. INTRODUCCIÓN

México es considerado el centro de origen, domesticación y diversificación de las especies de *Opuntia* en el mundo. De las aproximadamente 200 especies de nopales que existen, 101 viven en México, y de las 93 del género *Opuntia*, 62 especies son endémicas de México (**Unidad de Inteligencia Comercial, 2021; Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2021**). Existen más de 80 variedades de *Opuntia* spp. cultivadas, así como silvestres a lo largo del territorio mexicano, particularmente en el Altiplano Central Mexicano (**COMETUNA et al., 2009**). Tanto los nopales como las tunas son íconos culturales en México ya que son importantes desde el punto de vista histórico, gastronómico y económico. La tuna representa el sexto cultivo de frutas más grande (en peso) cosechado en el país, y el 95% de la producción se consume localmente (**Sumaya-Martínez et al., 2010**), siendo México el mayor productor de tunas en el mundo (443,604.40 toneladas en 2022) (**Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP], 2023**), y el país con mayor superficie agrícola dedicada a este cultivo (más de 48 mil hectáreas) (**Fideicomiso de Riesgo Compartido, 2017**). A pesar de estos hechos, sorprendentemente la caracterización de la rica diversidad de tunas presentes en México sigue siendo una tarea por realizar.

Según **Esparza (2010)** la mayor diversidad en cuanto a número de especies de *Opuntia* identificadas hasta el momento en México se ubica entre los 1500 y 2000 msnm a una latitud entre 20° y 23° norte, y una longitud entre 99° y 101° este. Esta región corresponde a las tierras altas del Altiplano Central Mexicano, donde se concentra el 90 % de la diversidad total de tunas que se encuentran en el país (**SEMARNAT, 2021**), siendo las principales regiones productoras de tuna: Puebla, Valle de México y el Altiplano Potosino-Zacatecano (**Domínguez-García et al., 2017**). En México se cosechan tunas desde marzo hasta noviembre, sin embargo, los porcentajes de tuna cosechados en los primeros meses (marzo y abril) y en el último (noviembre) es mínimo (**Corrales & Flores, 2003**), aunque esto depende, a su vez, de la variedad (**Pimienta-Barrios, 1994**) y diversas condiciones climáticas. Estos frutos se han utilizado desde tiempos prehispánicos como alimento y actualmente se conoce que es un alimento nutraceutico, consumiéndose principalmente en fresco y en temporada (**González & Vela, 2010**).

En México se han registrado al menos 60 variedades diferentes de tunas (**Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural [SADER], 2020**), sin embargo, quedan muchas más por identificar. A nivel nacional se conocen menos de 8 variedades (Alfahayucan, Blanca Cristalina, Blanca Burrón, Criolla, Pico Chulo, Rojo Liso, Reyna, Roja pirámides, entre otras) (**Ayllon et al., 2015**). Puesto que se sabe que existen más de las 60 variedades de tuna de las registradas, las 8 variedades anteriormente mencionadas son conocidas, principalmente, debido a que tienen una gran relevancia comercial, la cual está directamente relacionada a su exportación, sin embargo, muchas otras variedades de tuna no han sido comercialmente explotadas debido a que no se tiene mucha información sobre ellas. Asimismo, los nopales junto con sus tunas sufren de una percepción de ser una fruta de bajos ingresos (asociada a las comunidades rurales). Gran parte de esto influye en una falta de demanda de estos frutos, que en la mayoría de los casos terminan siendo consumidos localmente (**Delgadillo-Macías, 2019**). Y aunque hay diversas variedades seleccionadas para exportación, muchas se terminan perdiendo al caer demasiado maduras de las almohadillas del cactus, pudriéndose antes de ser cosechadas. Así, como mencionan **Corrales & Flores (2003)**, dentro del país una parte reducida de la comercialización de la tuna es efectuada de forma semiprocesada (tuna cortada fresca), y se suele vender a orillas de caminos (carreteras) aledañas a las zonas de producción y algunas localidades. Sin embargo, esta comercialización es realizada “... de manera improvisada, empírica y heterogénea...” (**Corrales & Flores, 2003, p. 144**). Y es que, de manera general, existe una falta de conocimiento sobre la posición de México con respecto a la gran diversidad de especies del género *Opuntia* que se encuentran en el país y sus propiedades organolépticas únicas, así como con la información técnica necesaria para su comercialización.

Esta falta de interés y de conocimientos sobre las propiedades fisicoquímicas y sensoriales de la gran diversidad de tunas en México, aunada a la falta de conciencia de la población en general por la riqueza del fruto de *Opuntia* en el país es la motivación para demostrar, con datos científicos, el inmenso potencial de las tunas. Toda la región podría beneficiarse

de la generación de conocimiento sobre su propia diversidad local. Así, este conocimiento podría también apoyar a las autoridades locales y federales para dirigir su atención al inmenso potencial de esta región y, a cambio, favorecer a las comunidades rurales locales que dependen de este cultivo para vivir.

Con esto en consideración, se realizó la evaluación de distintos parámetros de 13 frutos de tuna (*Opuntia* spp.), tratándose de 12 variedades distintas puesto que una de las variedades (Reyna) fue evaluada en dos estados distintos de desarrollo fisiológico. Así, en la **Tabla 1** se muestran las variedades de tuna evaluadas en el presente estudio.

Tabla 1. Muestras de tuna (*Opuntia* spp.) analizadas del Altiplano Mexicano y del Valle de Teotihuacán.

Región de Origen	Variedad
Altiplano Mexicano	Cristalina
	Amarilla Montesa
	Amarilla Venado
	Cardona
	Roja Pelona
	“Naranjona”
	Charola
	Amarilla Miquihuana
Valle de Teotihuacán	Reyna
	Pico Chulo
	Roja San Martín
	Amarillo Plátano

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Tuna (*Opuntia* spp.)

2.1.1. Definición

La tuna es el fruto del nopal del género *Opuntia*, el cual crece en el cladodio del nopal, tratándose de una baya polispérmica, carnosa ovoide o piriforme, de dimensiones variables (dependiendo de la especie y variedad) con una epidermis recubierta de gloquidas o ahuates (espinas pequeñas, finas de 2 – 3 mm de longitud). El color es diverso tanto de cáscara como pulpa, las cuales pueden ser verde, blanca, amarilla, naranja, roja, rosa o púrpura, dependiendo de la variedad. Caracterizándose por ser un fruto jugoso y dulce. (Amaya, 2009; Secretaría de Economía, 2006).

2.1.2. Fisiología

Los nopales se encuentran en gran variedad de climas en México, desde climas tropicales hasta áridos, incluidos algunos templados. Sin embargo, los nopales tuneros se desarrollan principalmente en climas templados subhúmedos (Cw) y semiáridos (BS). Dos de los factores más importantes para el cultivo de la tuna son: temperatura y precipitación (Corrales & Flores, 2003). Así, la tuna está muy bien adaptada a estas zonas ligeramente templadas, áridas y semiáridas, siendo capaces de soportar hasta cierto grado las sequías gracias a que se trata de una planta suculenta o crasa (con tejidos acumuladores carnosos), acumulando grandes cantidades de agua en su tallo, además de las características anatómicas de la epidermis (Paucara, 2017).

Diversos autores (Alvarado, 1978; Kuti, 1992; Pimienta, 1990; Wessels, 1988 & 1990: citados por Nerd & Mizrahi, 1995) han identificado que el tipo de patrón de crecimiento de la tuna es sigmoideal, y otros autores (Barbera *et al.*, 1992; Weiss *et al.*, 1993: citados por Nerd & Mizrahi, 1995) coinciden con lo anteriormente mencionado, adicionalmente reportando que la tuna posee un patrón de crecimiento doble sigmoide con tres fases claras:

1. *Crecimiento acelerado*: ganancia de peso en fruto fresco y seco de la cáscara.
2. *Detención del crecimiento*: en la parte inicial se da un desarrollo de la semilla, y en la parte final se da un desarrollo de la pulpa.
3. *Reanudación del crecimiento*: desarrollo de la pulpa.

Así, el desarrollo completo de la tuna puede tomar entre 80 – 90 días, dependiendo de las condiciones ambientales (**Corrales & Flores, 2003**). Sin embargo, **Lakshminarayana et al. (1979)** determinaron que la tuna (*Opuntia amyclaea* Tenore) se trata de un fruto de ciclo corto, o bien, que su proceso de maduración hasta alcanzar su madurez de cosecha toma alrededor de 120 días.

La tuna ha sido caracterizada como un fruto no climatérico debido a su relativamente baja tasa de respiración postcosecha, junto con su tendencia a declinar, en comparación con otros frutos (**Corrales & Flores, 2003; Paucara, 2017**), es decir, tras su maduración y cosecha, no presentan aumento en la respiración ni en la producción de etileno (manteniéndose en un nivel basal) (**Martínez-González et al., 2017**), entre otros factores. Además, durante su desarrollo no acumula almidón para utilizarlo como reserva energética, junto con su bajo incremento de azúcares en postcosecha (**Tucker, 1993**). Estas características dependen de la variedad de tuna (**Corrales & Flores, 2003**), etapa de madurez al momento de la cosecha, tipo de cultivo y condiciones ambientales (**FAO/WHO & ICARDA, 2018**). De esta manera, su cosecha debe ser realizada cuando se alcance la madurez de consumo (**Paucara, 2017**).

2.1.3. Ecofisiología

La utilidad agrícola de las plantas del género *Opuntia*, entre muchos otros factores, se debe a su modalidad de apertura de estomas (poros microscópicos en la superficie de hojas y tallos que regulan el intercambio de gases). Las plantas de este género, por ejemplo *O. ficus-indica*, abre sus estomas durante la noche, de tal forma que la pérdida de vapor de agua y la entrada de CO₂ se llevan a cabo en la parte más fresca del ciclo de 24 horas; en contraste con otras especies vegetales donde llevan a cabo este proceso de forma diurna. Así, este patrón de intercambio de gases se conoce como el Metabolismo Ácido de las Crasuláceas (CAM por sus siglas en inglés) (Richar, 2010).

A lo largo del desarrollo de este fruto se pueden dar ligeras interrupciones del crecimiento, por ejemplo, por periodos de sequía durante esta etapa (Cruz, 1983). Este fenómeno en particular puede provocar la aparición de rasgaduras en el pericarpio, e incluso la abscisión del fruto (Hernández, 1978) y su pérdida. Así, la tuna tiene una gran resistencia a las condiciones climáticas, especialmente a la temperatura y, como se mencionó anteriormente, este puede desarrollarse bajo distintas condiciones climáticas (Unidad de Inteligencia Comercial, 2021). De esta manera, existen diversos factores externos que influyen en la actividad respiratoria de los frutos, como son la temperatura, la concentración de O₂ y CO₂ en el ambiente, humedad, nutrición, presión atmosférica entre algunos otros (Nitsch, 1953). La gran distribución del nopal en el mundo es indicativa de su gran capacidad de adaptación a factores climáticos y de suelo (Brutsch, 1979).

La tuna es un fruto que requiere para su desarrollo de una temperatura media anual entre 12–34 °C, y aunque hay algunas variedades de nopal que resisten altas temperaturas (50 °C), muchos de los nopales tuneros se desarrollan mejor a temperaturas máximas ligeramente menores a 35 °C, e incluso algunas variedades resisten temperaturas de 5 – 10 °C por periodos cortos (Corrales & Flores, 2003; Amaya, 2009; Ayllon *et al.*, 2015; Paucara, 2017; Unidad de Inteligencia Comercial, 2021). Así, esta planta es capaz de tolerar temperaturas muy altas sin consecuencias negativas (Nobel *et al.*, 1986), pero es sensible a temperaturas

inferiores a 0 °C (**Inglese, 1995**), particularmente durante la noche, siendo el rango de temperatura diurna/nocturna óptimo para nopal de 25/15 °C. Así, se sugiere que, para algunas variedades de tuna, por ejemplo, de la especie *O. ficus-indica*, su cultivo sea en una región con clima seco, pero no muy caliente (**FAO/WHO & ICARDA, 2018**). Además, se sabe que la actividad respiratoria aumenta rápidamente con la temperatura hasta un máximo para caer rápidamente después de cierta temperatura (**Nitsch, 1953**). De igual manera, se ha visto que su crecimiento es más acelerado en climas calurosos que en climas fríos (**Nerd et al., 1991; Wessels et al., 1990: citados por Nerd & Mizrahi, 1995**). Asimismo, frutas desarrolladas hasta su madurez completa bajo condiciones de temperatura alta y humedad relativa baja son altamente susceptibles a daños por frío, pero más resistentes a infecciones microbianas; mientras que frutos desarrollados al final de temporadas de lluvia (menor temperatura y mayor humedad relativa) son más susceptibles a pudrición, pero más resistentes al daño por frío (**Schirra et al., 1999**), a su vez afectando la firmeza, el tamaño y el peso de estos.

Los nopales tuneros se desarrollan de manera óptima a una precipitación pluvial media anual (PPMA) de entre 400 – 800 mm de agua, incluso con 125 mm de agua, aunque de manera general se pueden desarrollar entre 150 – 1800 mm de agua; y una altitud de 800 – 1800 m s.n.m (metros sobre el nivel del mar). Algo importante a notar es que estos rangos se refieren a condiciones óptimas para un desarrollo óptimo del fruto de la tuna, pero pueden salirse de estos rangos. Aunque se sabe que este cultivo es resistente a la falta de agua, para su producción de calidad, la planta debería de tener una fuente de agua cercana y accesible (**Amaya, 2009; Ayllon et al., 2015; Paucara, 2017; Unidad de Inteligencia Comercial, 2021**). Ciertas variedades de tuna son cultivadas en regiones donde la PPMA es menor a 300 mm de agua; sin embargo, la planta requiere de un riego complementario para la obtención de rendimientos adecuados para seguir contando con buena calidad en los frutos en términos de peso en base seca (aunque en condiciones elevadas de temperatura y sequía prolongada este riego puede no ser suficiente para el desarrollo de los frutos); es de esta forma que, en condiciones de baja humedad, el tamaño de los frutos se reduce (**Barbera, 1984; Gugliuzza et al., 2002; Van der Merwe et al., 1997: citados por FAO/WHO & ICARDA, 2018**).

La información climatológica de las zonas de cultivo de tuna **Tabla 2** puede ser de ayuda para la predicción en cierto grado de la cantidad de azúcares, algunos otros parámetros fisicoquímicos, y del perfil sensorial de las muestras. Aunque también se deben considerar eventos climáticos, como la sequía que se dio en 2022 especialmente en el norte del país, afectando la producción de cultivos (incluyendo a la tuna a pesar de su gran adaptabilidad y resistencia).

Tabla 2. Condiciones climatológicas de los estados y localidades de origen de las muestras de tuna (*Opuntia* spp.) analizadas del Altiplano Mexicano y del Valle de Teotihuacán.

Estado	Temperatura Mínima Anual (°C)	Temperatura Máxima Anual (°C)	Temperatura Media Anual (°C)	Precipitación Pluvial Media Anual (mm agua)	Localidad	Altitud Promedio (msnm)	Tipo de Clima
Edomex	3.0 (Ene-Feb)	25.0 (Abr-May)	14.7	900	San Martín de las Pirámides	2301	Seco y semiseco
					Santiago Tolman, Otumba	2353	
SLP	8.4 (Ene)	32.0 (May)	21.0	950	Mexquitic de Carmona	1998	Seco y semiseco / Muy seco
					San Antonio de Eguia, Armadillo de los Infante	2200	
					Villa de Arriaga	2177	Seco y semiseco
					El Valle de Palomas, Armadillo de los Infante	2020	Seco y semiseco / Muy seco
Tamps.	10.0 (Ene)	22.0 (Jun-Ago)	23.5	780	Miquihuana	1845	Templado subhúmedo / Seco y semiseco

Fuente: INEGI (s.f.; 2022).

Gracias a su gran capacidad de adaptación y desarrollo en condiciones adversas con respecto a una gran cantidad de especies vegetales (**Paucara, 2017**), la tuna representa un recurso importante en la economía rural en México y muchos otros países en el mundo, particularmente de zonas áridas, convirtiéndose así en una buena alternativa para la recuperación de ciertos ecosistemas.

2.1.3.1. Frutos no climatéricos

Se ha visto que, en frutos no climatéricos, temperaturas inferiores de su rango óptimo de desarrollo conllevan a una mayor durabilidad del fruto, pero con un lento desarrollo y baja producción. Sin embargo, cuando se cultiva a temperaturas mayores de su rango óptimo de desarrollo se provoca un estrés hídrico y se reduce la duración de vida del fruto (**Castro, 2001; Fischer, 2010**). De manera similar, la tuna, a temperaturas menores de su rango óptimo de desarrollo, podría presentar el mismo comportamiento. También, se ha visto que este tipo de frutos no climatéricos, a mayor temperatura de cultivo, tanto diurna como nocturna, menor el contenido de sólidos solubles, y azúcares totales (glucosa y fructosa en su mayoría, azúcares reductores); así como menor luminosidad en el color (L^* ; siendo más oscuros) del fruto y un menor ángulo en el tono del color (h ; yéndose a tonalidades marrones), pero una mayor saturación en el color (C^* ; siendo de tonalidades más brillantes) (**Wang & Camp, 2000; Al-Maiman & Ahmad, 2002**); siendo estos parámetros (de color y fisicoquímicos) de importancia en la evaluación de la calidad de diversos frutos.

Igualmente, de acuerdo con el estado de maduración, a medida que madura el fruto, el pH, el contenido de sólidos solubles y el contenido de azúcares totales (principalmente glucosa y fructosa) aumenta ligeramente, aunado a una disminución en el contenido de humedad en la pulpa (**Wang & Camp, 2000; Al-Maiman & Ahmad, 2002**).

2.1.4. Características físicas y fisicoquímicas de variedades de tuna

Las variedades de tuna evaluadas en el presente estudio se presentan en la **Sección 5.1**. Diversos autores han analizado distintos parámetros en estos frutos, presentados a continuación.

La variedad Reyna, también conocida como Reina, Alfahayucan o Alfajayucan (*Opuntia albicarpa* u *O. amyclaea*), ha mostrado que el peso promedio del fruto es de 187 g, de los cuales 106 g corresponden a la pulpa, así como 74 g para la cáscara y 7 g para semillas, y un tono del color en pulpa de 93.64°. También, se ha reportado un contenido de azúcares reductores del 8 g/100 g, vitamina C entre 31 – 100 mg EAA/100 g, pH de 6.16 – 6.80, acidez entre 0.047 – 0.080 % ácido cítrico, contenido de sólidos solubles de 13.12 – 14.40 °Bx; así como algunos pigmentos, como betacianinas (< 20 mg EB/L), betaxantinas (< 10 mg EI/L); y también compuestos fenólicos (~ 450 mg EAG/L) (**Pimienta-Barrios, 1994; Sumaya-Martínez et al., 2011; Monroy-Gutiérrez et al., 2017**).

En la variedad Cristalina, también llamada Blanca o Blanca Cristalina [*O. albicarpa*, considerándose un híbrido natural entre *O. ficus-indica* y *O. streptacantha* (Pimienta-Barrios, 1994)], se ha observado que el peso promedio del fruto es de 210 – 240 g, correspondiendo a la pulpa 152 g (con un tono de color en pulpa de 94.10°), 79 g para la cáscara (con 4.02 – 8.00 mm de grosor) y 8 g para las semillas. También, se ha observado que esta variedad puede tener un contenido de materia seca del 12.87 %, un contenido de sólidos solubles en esta variedad puede ser de 13.25 – 13.83 °Bx, 14.55 % de azúcares totales (glucosa, fructosa y sacarosa), así como un pH de 6.33, acidez del 0.07 % ácido cítrico, y un contenido de vitamina C de 8.22 mg EAA/100 g. Adicionalmente, se ha estudiado la presencia de algunos pigmentos como la clorofila (118.82 mg/100 g), carotenos (1.19 mg/100 g), betacianinas (10.16 mg EB/100 g), betaxantinas (9.81 mg EI/100 g), así como el contenido de fenoles totales (21.46 mg EAG/L) (**Pimienta-Barrios, 1994; Figueroa-Cates et al., 2010; Zenteno-Ramírez et al., 2015; Monroy-Gutiérrez et al., 2017**).

La variedad de tuna Amarilla Montesa, o bien, Amarilla Monteza (*O. megacantha*), ha presentado un grosor de cáscara de 3.24 mm, así como un ángulo del color en pulpa de 70.49°, y un contenido de materia seca del 12.00 %. También, se ha visto que esta variedad puede presentar un contenido de sólidos solubles de 13.83 – 14.52 °Bx, junto con un contenido de azúcares reductores de 11.91 %, un pH de 6.30, y una acidez del 0.04 % ácido cítrico. Asimismo, se ha estudiado la presencia de vitaminas y algunos otros compuestos que contribuyen a cierta actividad antioxidante, como vitamina C (9.35 mg EAA/100 g), clorofila total (35.98 mg/100 g), carotenos (36.73 mg/100 g), betacianinas (16.02 mg EB/100 g), betaxantinas (43.93 mg EI/100 g), así como fenoles totales (154.56 mg EAG/L) (**Figuroa-Cates et al., 2010; Zenteno-Ramírez et al., 2015; Monroy-Gutiérrez et al., 2017**).

En la variedad de tuna Pico Chulo (*O. megacantha*), se ha observado un contenido de materia seca en su pulpa del 12.52 %, así como un contenido de sólidos solubles del 13.43 – 14.8 °Bx, pH de 6.11 – 6.33, y una concentración de azúcares reductores del 11.88 %. Adicionalmente, el contenido de vitamina C se ha determinado entre 11.49 – 200 mg EAA/L, junto con un contenido de betacianinas y betaxantinas entre 25.00 – 81.37 mg EB/L y 40.00 – 49.40 mg EI/L, respectivamente, así como clorofila total y carotenos de 20.40 – 42.35 mg/100 g, respectivamente. También, se ha visto un contenido de fenoles totales de 141.44 – 375 mg EAG/L (**Figuroa-Cates et al., 2010; Sumaya-Martínez et al., 2011; Zenteno-Ramírez et al., 2015**).

La variedad de tuna Cardona, o también llamada Cardón (*O. streptacantha*), a través de diversos estudios (**Pimienta-Barrios, 1994; Chavez-Santoscoy et al., 2009; Zenteno-Ramírez et al., 2015**), se ha visto que presenta un contenido de materia seca del 14.06 %, junto con un color de pulpa en el espacio CIELab de 5.0, 9.1, 4.1, así como un tono del color de 24.2°, sólidos solubles en 13.33 – 14.07 °Bx, pH en pulpa de 5.10 – 6.50, acidez titulable entre 0.060 – 0.070 % ácido cítrico, y un contenido de azúcares reductores entre 8.00 – 14.68 %. Asimismo, se han observado contenidos de vitamina C de 9 mg EAA/100 g, betacianinas

de 112.8 µg EB/g, betaxantinas de 66.3 µg EI/g, junto con un contenido de flavonoides de 324.4 µg EQ/g, y fenoles totales en 195.5 µg EAG/g.

La variedad de tuna Roja San Martín, Rojo San Martín, o en ocasiones San Martín a secas (*O. megacantha*), originaria inicialmente de San Martín de las Pirámides, Edomex, ha sido analizada en distintos parámetros fisicoquímicos (**Sumaya-Martínez et al., 2011; Alba, 2013**), donde se ha encontrado que la pulpa presenta una saturación del color de 10, un contenido de sólidos solubles de 13.40 – 14.12 °Bx, pH de 5.82 – 6.42, un contenido de azúcares totales de 190.23 mg/mL, y una concentración de vitamina C ligeramente arriba de 200 mg EAA/L. También, se ha estudiado su contenido de betacianinas (25.00 – 122.37 mg EB/L), betaxantinas (50 mg EI/L), y fenoles totales (450 – 645 mg EAG/L).

La variedad de tuna Amarillo Plátano, Amarilla Plátano o simplemente Plátano (*O. megacantha*), ha presentado un grosor de cáscara de 4.17 mm (con tono de color en pulpa de 71.81°), así como 12.47 °Bx y 0.08 % ácido cítrico. Asimismo, se ha visto que esta variedad muestra un contenido de vitamina C de 23.85 mg EAA/100 g, de betacianinas y betaxantinas en su pulpa de 2.51 y 8.50 mg/100 g, respectivamente, así como contenidos de fenoles totales de 113.22 mg EAG/100 g y de flavonoides 6 mg EQ/100 g (**Ramírez-Ramos et al., 2015; Monroy-Gutiérrez et al., 2017**).

La variedad de tuna Roja Pelona, también llamada Rojo Pelón (*O. ficus-indica*), ha sido estudiada por algunos autores (**Pimienta-Barrios, 1994; Zenteno-Ramírez et al., 2015; Monroy-Gutiérrez et al., 2017**), encontrando que su peso promedio ha sido de 116 g, de los cuales 59 g corresponden a la pulpa (con 12.97 % de materia seca, y un tono del color de 34.04°), así como 52 g para la cáscara (grosor de 5.70 mm) y 5 g para semillas. También, se ha visto que este fruto puede contener entre 13.25 – 13.53 °Bx, con 0.04 – 0.06 % de ácido cítrico y pH de 6.23 – 6.40, además de un contenido de azúcares (reductores) entre 8.00 – 11.64 %, y 17 mg EAA/100 g de vitamina C.

La variedad de tuna Naranjona (*O. megacantha*), ha mostrado un peso, en promedio, de 114 – 125 g, con 59 g correspondientes a la pulpa, así como 52 g para la cáscara (~ 0.5 cm de grosor) y 3 g para semillas. Asimismo, se ha reportado un contenido de azúcares reductores del 10 %, vitamina C en 19 mg EAA/100 g, pH de 7.0 y una acidez de 0.030 % de ácido cítrico (Pimienta-Barrios, 1994; Corrales & Hernández, 2005).

Para la variedad de tuna Charola (*O. streptacantha*), se ha encontrado que el contenido de sólidos solubles en el jugo de la pulpa es de 13.17 °Bx, pH de 5.77, un contenido de materia seca del 12.78 %, un contenido de azúcares totales (glucosa, fructosa y sacarosa) del 12.81 % (Zenteno-Ramírez *et al.*, 2015).

En cuanto a la variedad Amarilla Miquihuana (*O. lasciacantha*), no se encontró investigación relacionada a parámetros fisicoquímicos o perfil sensorial (aunque sí de estudios genéticos). En caso de inexistencia de dicha información, este trabajo podría considerarse el primero en la investigación de dicha variedad, particularmente en la investigación de todos los parámetros evaluados en el presente estudio.

Por otro lado, en la **Tabla 3** se muestran algunos estudios realizados en variedades de tuna distintas a las anteriormente mencionadas.

Tabla 3. Algunos estudios realizados en distintas variedades de tuna (*Opuntia* spp.).

Año	Variedad analizada	Origen de muestras	Análisis realizados*	Referencia
1994	<i>O. sp.</i> : Burrón, Blanca de Castilla, Papatón, Chapeada, Mexicana, Pepinillo, Camuesa, Fafayuco, Calabazona, Serrana, Roja, Blanca, Tapón, Jarrillo, Bola de Masa, Redonda, Mazuda. <i>O. robusta</i> : Tapón <i>O. streptacantha</i> : Apastillada, Pachona. <i>O. hypiacantha</i> Weber: Cascarón. <i>O. ficus-indica</i> : Amarilla-huesona, Pelón-blanco	Altiplano Central Mexicano y Edomex	Peso de fruto, de pulpa, de cáscara y de semillas, azúcares reductores, vitamina C, proteína, pH, acidez.	Pimienta-Barríos (1994)
1998	<i>O. ficus-indica</i> sp.	Francia	Composición química en base seca, azúcares, minerales.	Lamghari et al. (1998)
2005	<i>O. ficus-indica</i> & <i>O. robusta</i> : variedades verde, naranja, roja y púrpura.	California, EE. UU.	Sólidos solubles, pH, fenoles totales, betaxantinas, betacianinas, vitamina C.	Stintzing et al. (2005)
2006	<i>O. sp.</i> : ElKelaâ, Skhour Rehamna, AitBaâmrane	Marruecos	Peso de fruto, de pulpa, de cáscara y de semillas, sólidos solubles, pH, acidez titulable, materia seca, cenizas, azúcares reductores, proteína, minerales.	El-Gharras et al. (2006)
2007	<i>O. diillenii</i> & <i>O. ficus-indica</i> : variedades verde y naranja.	Tenerife	Peso de fruto, porcentaje de pulpa y de semillas, humedad, sólidos solubles, composición química, pH, acidez, vitamina C, fenoles totales, minerales.	Medina et al. (2007)
2009	<i>O. robusta</i> : Gavia, Amarillo, Tapón. <i>O. ficus-indica</i> : Pelón. <i>O. violaceae</i> : Moradillo. <i>O. rastrera</i> : Rastrero. <i>O. leucotricha</i> : Duraznillo Blanco, Duraznillo Rojo.	Nuevo León, México	Porcentaje de pulpa, pH, acidez, sólidos solubles, color instrumental, fenoles totales, flavonoides, betaxantinas y betacianinas.	Chavez-Santoscoy et al. (2009)
2010	<i>O. sp.</i> : Argelina, Gymno Carpo, Meyers, Morado, Nudosa, Robusta × Castillo, Roedtan, Skinners Court, Tormentosa, Turpin, Van As, Zastron. <i>O. albicarpa</i> : Mansa, Vaquera, Mango. <i>O. ficus-indica</i> : Amarilla Diamante, Pabellón. <i>O. megacantha</i> : Rosa de Castilla, Torreaja. <i>O. cochineria</i> : Cacalote. <i>O. robusta</i> : Tapón Aguanoso.	Sudáfrica Zacatecas, México	Peso de fruto, porcentaje de pulpa, sólidos solubles, pH, acidez titulable, vitamina C, azúcares reductores. Vitamina C, clorofila total, carotenos, betanina, indicaxantina, fenoles totales, capacidad antioxidante.	de Wit et al. (2010) Figueroa-Cates et al. (2010)
2011	<i>O. ficus-indica</i> : Vigor, Lirio, Lisa, Rosa María, Milpa Alta. <i>O. albicarpa</i> : Reina, Pico Chulo, Huesona. <i>O. megacantha</i> : Torreaja. <i>O. spp.</i> : Púrpura, Profundo, San Martín.	Hidalgo, Puebla, Jalisco, Zacatecas, Guanajuato, Edomex, México	Sólidos solubles, pH, betacianinas, betaxantinas, fenoles totales, capacidad antioxidante.	Sumaya-Martínez et al. (2011)
2012	<i>O. megacantha</i> : Rubí Reyna, Camuezo. <i>O. robusta</i> : Tapón Aguanoso. <i>O. spp.</i> : Moradilla, Apastillada, Pintadera.	Chapingo, Edomex; El Orito, Zacatecas; San Agustín Tlaxiaca, Hidalgo	Peso del fruto, porcentaje de pulpa, cáscara y semillas, parámetros del color, análisis proximal, sólidos solubles, acidez titulable, pH, betanina.	Aquino et al. (2012)
2013	<i>O. ficus-indica</i> (L.): variedad violeta.	Mukogodo, Kenia	Composición química, minerales.	Chiteva & Wairagu (2013)
2014	<i>O. ficus-indica</i> : Skhour, Alkalaa, Yellow Khouribga, Red Khouribga, Tamellalet, Doukala, Ras Elain, Ben Guerir, Ait Baamrane.	Marruecos	Peso de fruto, de cáscara, de pulpa y de semillas, longitud y diámetro de fruto, humedad, sólidos solubles, pH, acidez, azúcares reductores, composición química, minerales, fenoles totales.	Dehbi et al. (2014)

*De relevancia para el presente estudio.

Tabla 3. (continuación)

Año	Variedad analizada	Origen de muestras	Análisis realizados*	Referencia
2015	<i>O. megacantha</i> : Morada. <i>O. ficus-indica</i> : Huatusco, Solferino, Roja Villanueva, Jade, Copena CEII, Copena V1. <i>O. robusta</i> : Tzaponopal rojo. <i>O. sp.</i> : Alteña Blanca, Alteña Roja.	Guanajuato, Jalisco, Veracruz, Edomex, Zacatecas y Puebla, México	Betacianinas, betaxantinas, fenoles totales, flavonoides, vitamina C.	Ramírez-Ramos et al. (2015)
2016	<i>O. sp.</i> : Achefri y Amouslem.	Arbaâ Sahel & Asgherkis, Marruecos	Peso de pulpa, azúcares, acidez, materia seca, fenoles totales, flavonoides, betalainas, betaxantinas, betacianinas	Bouzoubaâ et al. (2016)
	<i>O. ficus-indica</i> L.: variedad naranja	Argelia	Peso de fruto y de pulpa, peso de cáscara, longitud de fruto y de pulpa, diámetro de fruto y de pulpa, peso de semillas, color, pH, humedad, sólidos solubles, acidez titulable, fenoles totales, azúcares reductores, cenizas.	Bariza et al. (2017)
2017	<i>O. ficus-indica</i> : variedades naranja, blanca y roja.	La Paz, Bolivia	Peso de fruto, de pulpa, de cáscara, y de semillas, diámetro de fruto, tamaño de fruto, grosor de cáscara, composición química, minerales, sólidos solubles, vitamina C, evaluación sensorial (hedónica).	Paucara (2017)
	<i>O. ficus-indica</i> : variedad roja-morada. <i>O. robusta</i> : variedad roja-morada.	Querétaro, México	Sólidos solubles, pH, acidez titulable, cenizas, humedad, betacianinas, betaxantinas, y evaluación sensorial (analítico).	Torres-Borjórquez et al. (2017)
	<i>O. ficus-indica</i> : variedad amarilla	Moquegua, Perú	Sólidos solubles, pH, acidez, evaluación sensorial (hedónica).	Vizcarra (2017)
2018	<i>O. ficus-indica</i> : variedad amarilla.	Perú	Humedad, firmeza (dureza), pH, sólidos solubles, acidez, evaluación sensorial (hedónica).	Mostacero (2018)
2019	<i>O. ficus-indica</i> .	Argelia	Humedad, pH, acidez titulable, cenizas, azúcares reductores, carotenoides, fenoles totales, vitamina C, betalainas.	Hadj Sadok et al. (2019)
2019	<i>O. albicarpa</i> S. Var. Burróna	México Central	Peso de fruto, de cáscara y de semilla, diámetro polar y ecuatorial de fruto, diámetro de pulpa, grosor de cáscara, color de cáscara y de pulpa, penetración (dureza) en cáscara, sólidos solubles, pH, acidez total, clorofila.	Martín del Campo et al. (2019)
2020	<i>O. ficus-indica</i> L. Mill.: Colorada, Fresa, Blanco Buenavista, Blanco Fasnía	Islas Canarias	Longitud y tamaño ecuatorial de fruto, peso de fruto, porcentaje de cáscara, pulpa y semillas, acidez titulable, firmeza (dureza) de pulpa, color de cáscara y pulpa, betaxantinas, betacianinas, flavonoides.	Gómez-Maqueo et al. (2020)
	<i>O. ficus-indica</i> (L.) Mill.	Portugal	Composición química, azúcares reductores, minerales, vitamina C, fenoles totales, betalainas, carotenoides.	Silva et al. (2021)
2021	<i>O. ficus-indica</i> : variedades verde y roja. <i>O. macrocentra</i> Engelm. <i>O. phaeacantha</i> Engelm. <i>O. engelmannii</i> Salm-Dyck ex Engelmann	Chihuahua, México	Evaluación sensorial (analítica), colorimetría en cáscara y pulpa, composición química, pH, acidez titulable, fenoles totales, flavonoides, vitamina C, capacidad antioxidante, betacianinas y betaxantinas.	Valero-Galván et al. (2021)
	<i>O. ficus-indica</i> L. Mill: Rojo Liso.	Zacatecas, México	Sólidos solubles, firmeza (dureza).	Zegbe-Domínguez et al. (2021)

*De relevancia para el presente estudio.

2.1.5. Producción

En cuanto a producción de frutos en México, se ha observado una producción de tuna de 471,427 toneladas (ton) en 2020 (SADER, 2021). Sin embargo, en el 2022, la tuna se encontró en el puesto 14 con 443,604.04 ton (Tabla 4), teniendo mayor cultivo que la guayaba, durazno, zarzamora y frambuesa (SIAP, 2023). Aunque se ha tratado de un cultivo de relevancia para México, particularmente porque se exporta una parte de esta, ha tenido ligeros decrementos en producción debido a eventos climáticos, como sequías, puesto que se trata de un cultivo de modalidad temporal en su mayoría. Aun así, la producción de tuna ha mostrado ser una fuente importante de ingreso para el país (1,594,993.31 mdp) que incluso ha ido en aumento (SADER, 2021).

Tabla 4. Producción agrícola (ton) de frutos, modalidades de riego y temporal a nivel nacional en México, 2022.

Cultivo	Producción	Cultivo	Producción
Aguacate	2,603,498.45	Nopalitos**	872,151.18
Durazno	239,266.87	Papaya	1,140,501.08
Frambuesa	173,768.55	Pera	26,374.37
Fresa	539,610.83	Piña	1,251,094.46
Guayaba	321,049.94	Plátano	2,607,787.61
Limón	3,071,969.97	Sandía	1,119,233.83
Mango	2,164,435.86	Toronja	489,100.97
Manzana	808,920.53	Tuna	443,604.40
Melón	572,468.79	Uva	477,318.60
Naranja	4,850,029.74	Zarzamora	222,623.05

* Fuente: SIAP (2023).

** No es fruta.

2.2. Composición química

2.2.1. Humedad/agua y materia seca

El **agua** es un componente presente en todos los tejidos vivos (y organismos unicelulares), siendo incluso su mayor constituyente (**Badui, 2006**). El contenido de **humedad** o **agua** (total) es importante para la adecuada preservación y estabilidad, así como conveniencia en envasado y transporte de un alimento (procesado o sin procesar). Del mismo modo, el contenido de humedad es imperativo en la descripción de especificaciones o estándares compositionales (límites máximos o mínimos presentes en determinados alimentos, particularmente de calidad), y para expresar resultados de otras determinaciones analíticas de manera uniforme (**Nielsen, 2017**). Por otro lado, el contenido de **materia seca** (MS) se refiere a la masa de un alimento desprovista de toda el agua libre (y parte del agua ligada) contenida en este.

2.2.2. Carbohidratos

Los **hidratos de carbono** o **carbohidratos** (abreviándolos **CHO** debido a su composición) son polihidroxialdehídos (aldosas) y polihidroxicetonas (cetosas), con gran abundancia en células vegetales, y especialmente en el mundo; sintetizados a través de materia inorgánica (CO₂) mediante la fotosíntesis. Gran cantidad de compuestos orgánicos presentes en las células vivas son también derivados de CHO, como algunas vitaminas y aminoácidos, entre otros. Se pueden clasificar en varias categorías, como en monosacáridos (1 unidad de azúcar), disacáridos (2 unidades de azúcar), oligosacáridos (3 a 10 unidades de azúcar) y polisacáridos (más de 10 unidades de azúcar). Los monosacáridos son generalmente compuestos de sabor dulce (pese a algunos amargos), muy solubles en agua e insolubles en disolventes orgánicos y etanol (**Badui, 2006; Kan & Chen, 2021**).

2.2.2.1. Azúcares reductores

Existen algunos azúcares denominados **azúcares reductores**, los cuales son aquellos que tienen un grupo aldehído (las aldosas) que actúan como agentes reductores donando electrones a un agente oxidante, perdiendo un hidrógeno y ganando un oxígeno, llevando a la

formación de un ácido carboxílico (Nielsen, 2017). En el caso de los monosacáridos, todas las aldosas son azúcares reductores, mientras que las cetosas no lo son. Por otra parte, los disacáridos pueden ser o no azúcares reductores. Como se puede ver en la **Figura 1**, los grupos aldehído y hemiacetal se pueden reducir al donar electrones y cambiar su átomo de hidrógeno por un grupo óxido ($R-O^-$) o hidroxilo ($R-OH$) dependiendo del medio. Algunos de los azúcares reductores (mono- y oligosacáridos) son la glucosa, maltosa, isomaltosa, entre otros (Davis, 1995). En otras palabras, mientras uno de los carbonos centrales de los grupos de la **Figura 1** tenga hidrógeno, tiene la capacidad de oxidarse (agente reductor) y formar un ácido carboxílico, reduciendo un ion metálico u otra sustancia orgánica, generalmente insaturada (agente oxidante).

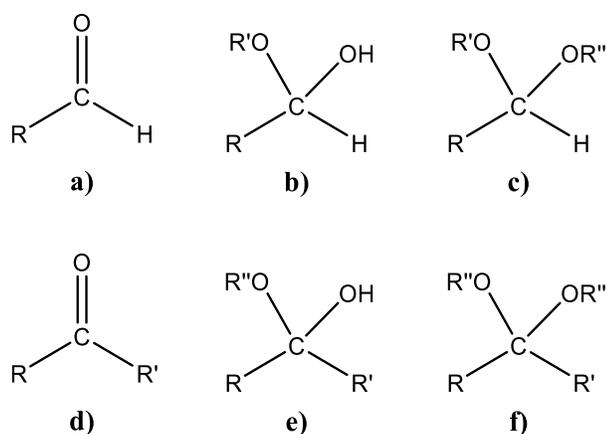


Figura 1. Estructura química de los grupos, **a)** aldehído (reductor), **b)** hemiacetal (reductor, forma cíclica en carbohidratos), **c)** acetal (reductor), **d)** cetona (no reductor), **e)** hemicetal (no reductor, forma cíclica en carbohidratos), y **f)** cetal (no reductor).

Fuente: Elaboración propia.

2.2.2.2. Polisacáridos y fibra

Los polisacáridos son un grupo diverso de polímeros. Generalmente en disolución producen dispersiones de tamaño coloidal y no tienen aroma (debido a que no se volatilizan) ni sabor perceptible. Tienen diversas funciones en los alimentos, y en muchas frutas controlan la cristalización de azúcares, sales y agua, estabilizan proteínas, sirven como fibra dietética, poseen una capacidad de retención de agua, y como reserva energética (Badui, 2006; Kan & Chen, 2021). Los polisacáridos se pueden clasificar de acuerdo con su digestibilidad por

el humano debido a la presencia o ausencia de enzimas capaces de degradarlos: digeribles y no digeribles. Asimismo, los polisacáridos no digeribles se pueden dividir en solubles e insolubles.

La **fibra dietética** pertenece a la clasificación de polisacáridos no digeribles (junto con otras sustancias que no se absorben por el organismo), tiene a su vez diversas funciones en el organismo, por ejemplo, regula la normal función intestinal, debido a su naturaleza (no digerible) reduce la respuesta hipoglucémica postprandial, así como su capacidad de disminuir el colesterol en suero sanguíneo. También, la fibra dietética funciona como prebiótico, utilizado ampliamente en alimentos tanto por esta capacidad (la cual ayuda a la microbiota intestinal), como por propiedades funcionales atribuidas al tipo de polisacárido no digerible utilizado, dependiendo de las propiedades funcionales deseadas para un producto alimenticio (Aluko, 2012; Nielsen, 2017). De esta manera se puede definir a la fibra dietética como las partes comestibles de plantas (así como carbohidratos análogos sintéticos) resistentes a la digestión por enzimas endógenas y absorción del intestino delgado humano, así como con una fermentación parcial o completa por la microbiota del intestino grueso. Estos carbohidratos están conformados por polímeros de 3 o más unidades monoméricas (oligo- y polisacáridos), lignina y otras sustancias vegetales asociadas, siendo solubles o insolubles, promoviendo efectos fisiológicos benéficos, como cierta actividad laxante, disminución de colesterol y/o glucosa en sangre, entre otras (Institute of Medicine [IOM] 2005; Codex Alimentarius Commission, 2009; Anon, 2016; Nielsen, 2017). Por otro lado, la **fibra cruda** es definida por Spiller (2001, p. 28) como el “Residuo sobrante después del hervido del alimento desengrasado en álcali diluido y después en ácido diluido [...]”.

2.2.3. Sólidos solubles

De acuerdo con Kimball (1991), en jugos de fruta un gran porcentaje de **sólidos solubles** está compuesto de azúcares disueltos donde, dependiendo del vegetal, la sacarosa se puede encontrar en aproximadamente el 50 % de estos azúcares, junto con otros azúcares como

glucosa, fructosa, entre otros. Asimismo, algunos ácidos orgánicos y sus sales, así como algunos otros minerales y vitaminas hidrosolubles contribuyen al contenido de sólidos solubles. Cabe destacar que la pulpa y material que provoque turbidez está considerado en el material insoluble.

Lakshminarayana et al. (1979) determinaron que el contenido de sólidos solubles es considerablemente mayor que el contenido de azúcares totales en tuna, siendo significativamente mayores en etapas tempranas del desarrollo del fruto constituidos por componentes distintos a azúcares, y en etapas posteriores de maduración, como en su maduración de consumo, pueden ser más similares estos dos parámetros. De esta manera, el contenido de sólidos solubles, junto con el contenido de azúcares, representan parámetros de gran importancia en la calidad de los frutos, particularmente en la tuna (**Corrales & Flores, 2003**).

2.2.4. Lípidos

Los **lípidos**, en general, son muy poco solubles en agua, pero con gran solubilidad en disolventes orgánicos como éter, cloroformo, entre otros. Según **Nielsen (2017)**, no existe una definición clara para los lípidos, pero podrían considerarse “como lípidos sólo a aquellas moléculas que son derivados reales o potenciales de los ácidos grasos” (**Badui, 2006, p. 245**), incluyendo a éstos últimos, pese a otro tipo de compuestos, con base en la consideración de solubilidad. Son compuestos orgánicos constituidos por carbono, hidrógeno, ligera proporción de oxígeno, y que ocasionalmente pueden contener átomos de fósforo y nitrógeno en sus estructuras. Tienen diversas funciones en el organismo, uno de los principales es como fuente energética, pues proveen gran cantidad de energía al consumirlas (9 kcal/g), así como una actividad biológica importante, como parte estructural en toda membrana celular, así como en los sistemas de transporte de diversos nutrimentos a través del organismo, vitaminas (véase la **Sección 2.2.6**) y hormonas, pigmentos (véase la **Sección 2.4**), como aislante térmico (estabilizante de la temperatura en tejidos, por tanto en el cuerpo), entre otras (**Badui, 2006; Kan & Chen, 2021**).

En los alimentos, los lípidos se encuentran como grasas (sólidas a temperatura ambiente, constituidas principalmente por ácidos grasos saturados, generalmente de origen animal) y aceites (líquidas a temperatura ambiente, constituidos principalmente por ácidos grasos insaturados, generalmente de origen vegetal), contribuyendo a la textura, atributos sensoriales (principalmente sabor) y nutrición. Tienen diversas clasificaciones, como en función de su estructura química, por su complejidad, por su capacidad para producir jabones, naturaleza (medianamente polar/anfipática y no polar), o en una clasificación más específica en grasas y aceites como se mencionó anteriormente, constituidos exclusivamente por triacilglicéridos (TAG), es decir, (tri)ésteres de ácidos grasos con glicerol. (Badui, 2006; Nielsen, 2017; Kan & Chen, 2021). El término *grasa* puede ser aplicable a todos los TAG, ya sean sólidos o líquidos a temperatura ambiente (Nielsen, 2017).

2.2.5. Proteína

Las **proteínas** se encuentran en todas las células (incluso en virus), con gran importancia biológica por sus múltiples funciones celulares como de transporte, motilidad, defensa, reconocimiento, almacenamiento, como enzimas y de estructura. En los alimentos, estas proveen de propiedades funcionales al alimento, así como de propiedades nutricionales, por lo que se consideran macronutrientes dentro de estos. De esta manera, de estos macronutrientes se obtienen los compuestos nitrogenados para el crecimiento y mantenimiento general del organismo (Badui, 2006; Kan & Chen, 2021).

Las proteínas son polímeros conformados por unidades de aminoácidos, siendo formadas a partir de 20 de estas unidades básicas. Sus propiedades fisicoquímicas, como su naturaleza hidrofílica o hidrofóbica, su carga, estado de agregación, entre otras, van a ser los puntos que determinarán la funcionalidad de la proteína, siendo resultado de la secuencia de aminoácidos, la longitud de la cadena (o cadenas) del polímero, así como la organización *per se* de toda la estructura. También, pueden clasificarse de acuerdo con su composición, estructura, función biológica e incluso por su solubilidad (Badui, 2006; Kan & Chen, 2021).

Una de las formas cuantificar proteína total, mediante proteína cruda, se cuantifica la cantidad de nitrógeno en la muestra del alimento analizado convirtiendo a proteína mediante el uso de un factor (siendo el valor estándar de 6.25 g proteína/1 g nitrógeno), y se dice que es “crudo” pues no todo el nitrógeno cuantificado pertenece a proteínas, sino a algunos otros compuestos nitrogenados como vitaminas, ácidos nucleicos, entre otros (Nielsen, 2017).

2.2.6. Vitaminas

Las **vitaminas** son micronutrientes presentes en muchos alimentos, generalmente en cantidades bajas [desde algunos $\mu\text{g}/\text{kg}$ de alimento hasta 200 mg/kg de alimento (Badui, 2006; Kan & Chen, 2021)]. Participan en gran cantidad de procesos metabólicos y fisiológicos vitales para todo organismo vivo ya sea animal, vegetal, fúngico, bacteriano, protozoario o arquea. La mejor forma de obtener dichos compuestos es a través de una dieta equilibrada y, aunque un exceso en la ingesta de vitaminas no siempre conlleva consideraciones negativas, hay algunas de estas, como la A, D y B₆, que pueden llevar a intoxicaciones. (Badui, 2006). Como se mencionó anteriormente, participan en distintas reacciones metabólicas, algunas catabólicas y otras anabólicas (principalmente de hidratos de carbono, proteínas y lípidos), en donde se produce energía (Kan & Chen, 2021).

Las vitaminas se llegan a agrupar en 13 compuestos principales con estructuras químicas orgánicas distintas, aunque en ciertos casos, la actividad biológica no es exclusiva de un sólo compuesto y puede cambiar, esto debido a que existen los llamados *vitámeros* (Badui, 2006), que son compuestos con estructura química orgánica similar de una vitamina, con ligeras diferencias en la estructura provocando una distinta actividad biológica. En ocasiones, se puede encontrar una vitamina en un vitámero sin actividad biológica (inactivo), por lo que cierto procesamiento puede propiciar reacciones que activen la funcionalidad o actividad biológica de dicha vitamina, haciéndola activa (pudiendo incluso propiciar algunas otras reacciones de degradación). Asimismo, también existen provitaminas, o precursores de vita-

minas que, tras la ingesta y ciertos procesos metabólicos, se produce la vitamina con actividad biológica específica pudiendo ser aprovechada por el organismo (Badui, 2006; Kan & Chen, 2021).

2.2.6.1. Vitamina C

La **vitamina C** es un derivado de hidratos de carbono (sintetizado a partir de la D-glucosa), tratándose de un ácido (ácido ascórbico) y agente reductor. Algo importante a notar es que los estereoisómeros L son los que tienen actividad biológica (**Figura 2**), mientras que los estereoisómeros D carecen de esta actividad biológica atribuida. Se trata de una vitamina indispensable (proveniente de la dieta) para el ser humano, ya que nuestro organismo (a diferencia de algunas otras especies animales) no la sintetiza, pero muchos vegetales sí, por lo que muchas frutas y verduras pueden aportar la vitamina C requerida en la dieta. (Badui, 2006).

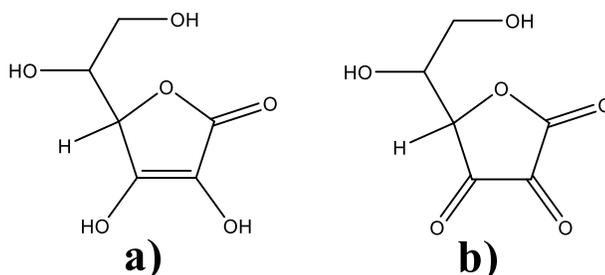


Figura 2. Estructura química de los vitámeros de la vitamina C, **a)** ácido L-ascórbico (forma reducida), y **b)** ácido L-deshidroascórbico (forma oxidada).

Fuente: Elaboración propia.

Esta vitamina interviene en diversos procesos en el cuerpo, como en la formación de los huesos, dentina de los dientes, paredes de capilares sanguíneos y cartílagos; en la síntesis de colágeno, norepinefrina y regeneración de vitamina E; en diversas reacciones de oxidación-reducción e hidroxilación de hormonas y aminoácidos aromáticos. Una de sus principales funciones también es como antioxidante celular y ayuda en la absorción intestinal del hierro. (Badui, 2006; Kan & Chen, 2021).

2.2.7. Minerales y cenizas

Los **minerales** se refieren a un grupo amplio de nutrimentos, siendo elementos químicos inorgánicos (metales principalmente) dentro de los alimentos, también denominados nutrimentos inorgánicos. Algunos de estos elementos son el azufre (S), bromo (Br), calcio (Ca), cloro (Cl), fósforo (P), hierro (Fe), litio (Li), magnesio (Mg), potasio (K), sodio (Na), yodo (I), selenio (Se), zinc (Zn), e incluso algunos otros como el aluminio (Al), cobalto (Co), cobre (Cu), manganeso (Mn) y titanio (Ti), entre muchos otros. De la misma forma que las vitaminas y aminoácidos, hay algunos minerales indispensables para el buen funcionamiento del organismo (**Badui, 2006; Kan & Chen, 2021**). Por esto, la ausencia de estos nutrimentos puede provocar serios daños a la salud; de tal forma que sólo a través de una dieta adecuada se evita la deficiencia de estos y otros nutrimentos (**FAO/ILSI, 1997; Badui, 2006; Kan & Chen, 2021**). Se encuentran en gran variedad de alimentos, tanto de origen animal como de origen vegetal, aunque muchos de estos dependen de las prácticas agrícolas principalmente y del tratamiento dado a estos alimentos previos a su consumo (tanto por el ser humano directamente, como por los animales para su posterior consumo). Sin embargo, consumirlos en la dieta no garantiza que serán aprovechados por el organismo. Por diversos factores como formas de estos minerales de baja biodisponibilidad, o agentes antinutricionales, no se absorben adecuadamente. Es por esto por lo que se hacen suplementos de minerales, pero también se encuentran en gran variedad de aditivos en productos procesados ya sea por el procesamiento en sí o por fortificación (**Badui, 2006; Galán et al., 2013; Nielsen, 2017; Kan & Chen, 2021**).

Una de sus principales funciones en el organismo es como cofactores en enzimas, así como integrado en vitaminas, hormonas, mioglobina y hemoglobina, en la formación de estructuras/ tejidos rígidos, en el control de presión en membrana celular mediante ósmosis, así como pH, y como constituyente importante en macromoléculas celulares (**Badui, 2006; Galán et al., 2013**).

Por otro lado, de acuerdo con **Nielsen (2017)**, las **cenizas** son, de forma directa, el residuo inorgánico (únicamente mineral) restante después de la combustión (seca) u oxidación ácida (húmeda) de toda la materia orgánica en el alimento. De esta manera, el contenido total de minerales en alimentos está dado por el contenido de cenizas en el mismo. El contenido de cenizas es uno de los parámetros de gran importancia en el análisis proximal (aunque también el análisis específico de minerales) de alimentos pues tiene relevancia nutricional, toxicológica y en calidad alimentaria. Igualmente, el contenido de estos nutrimentos en alimentos puede ir de 0 al 12 %, pero en alimentos frescos rara vez excede el 5 %, encontrándose en un rango variable del 0.2 – 1.9 % en frutas y vegetales (**Nielsen, 2017**).

2.3. Acidez titulable y pH

La acidez titulable cuantifica la concentración ácida total (ácidos). En alimentos, la acidez está dada casi en su totalidad por ácidos orgánicos, siendo los más comunes los ácidos cítrico, acético, láctico, tartárico y málico (**Figura 3**), aunque también se puede dar por algunos ácidos inorgánicos, como los ácidos carbónico (proveniente del CO₂ atmosférico disuelto y en equilibrios ácido-base) y fosfórico. Se ha visto que estos ácidos orgánicos tienen efectos sobre la percepción de alimentos, como en el sabor, color; así como en la estabilidad microbiana y en la calidad (mediante normatividad). Aquí se cuantifica la cantidad total de ácidos presentes en disolución, por tanto, se considera una acidez total, y se expresa en términos del ácido predominante (**Kilcast, 2013; Harris, 2016; Nielsen, 2017**). Asimismo, de acuerdo con **Nielsen (2017)**, este parámetro fisicoquímico es de gran importancia, junto con el contenido de azúcares, en frutas pues se trata de un indicador de madurez en dicho fruto (considerando la frescura). Así, la acidez tiende a disminuir conforme madura un fruto, mientras que el contenido de azúcares aumenta. Asimismo, de acuerdo con **Stintzing et al. (2001)**, el ácido cítrico es el ácido orgánico más abundante en la tuna, siendo el que se cuantifica.

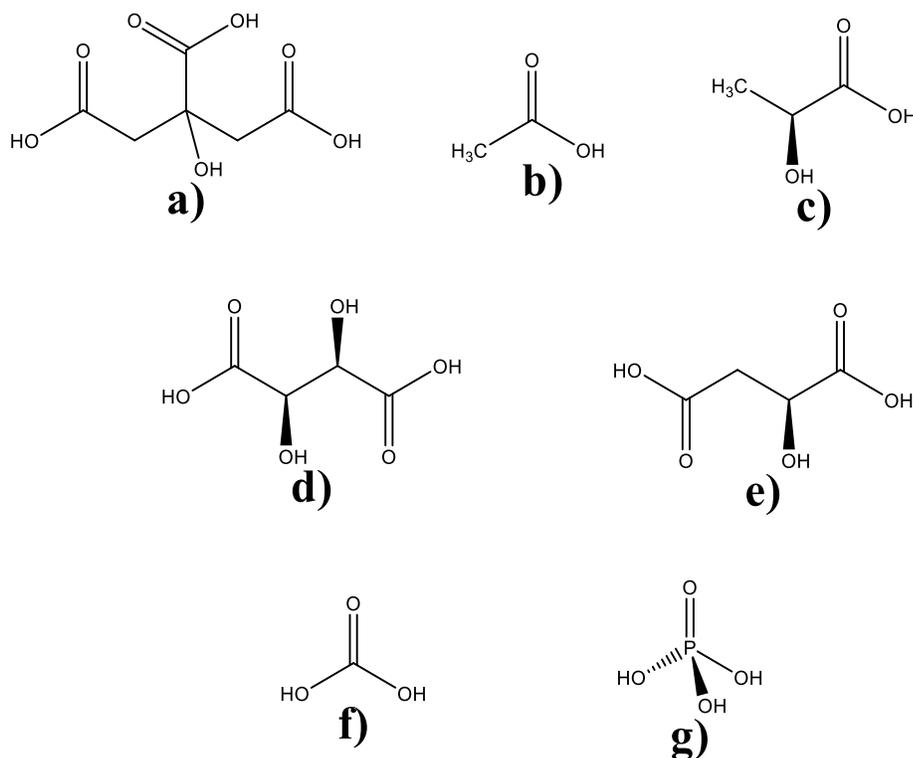


Figura 3. Estructura química de ácidos orgánicos más comúnmente presentes en alimentos, **a)** ácido cítrico (H₃Cit), **b)** ácido acético (HAc), **c)** ácido L-láctico (HLac), **d)** ácido L-tartárico (H₂Tar), **e)** ácido L-málico (H₂Mal), **f)** ácido carbónico (H₂CO₃), y **g)** ácido fosfórico (H₃PO₄).

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, el **pH** se basa en la concentración de iones H⁺, o H₃O⁺ de acuerdo con la teoría de Brønsted-Lowry, una de las varias teorías que explican las interacciones y equilibrios ácido-base, en disolución (Nielsen, 2017), en donde se llevan a cabo equilibrios de intercambio de iones hidronio (H₃O⁺) y iones hidroxilo (OH⁻), básicamente tratándose de iones hidrógeno (H⁺). De esta manera, el pH se puede definir como el logaritmo negativo (o antilogaritmo) de la concentración molar de iones hidrógeno en disolución (Harris, 2016; Nielsen, 2017). Todo esto sin olvidar los equilibrios ácido-base de otros ácidos orgánicos y sus sales, pues una alta concentración de uno de estos puede dominar en un rango de pH, por lo que el pH no se considera como una acidez total, sino aparente, siendo una medida de la fuerza ácida en solución (Kilcast, 2013; Harris, 2016).

2.4. Pigmentos y antioxidantes

Badui (2006) y **Damodaran et al. (2007)** mencionan que, en alimentos, el color se debe a gran variedad de factores, dependiendo del tipo de alimento, pero en muchos de estos (principalmente frutas, verduras, cereales y demás) dicha propiedad se debe a muchos diferentes compuestos, principalmente orgánicos, los cuales absorben la radiación electromagnética (luz), siendo la radiación reflejada por estos compuestos la que se percibe como el color. Aunque todos los alimentos tienen un color asociado, en ocasiones se desarrolla el color durante el manejo y procesamiento, o por adición de compuestos que producen color (ya sean sintéticos o naturales, denominados colorantes). Así, los **pigmentos** son sustancias naturales contenidas en células de tejidos vegetales, animales, fúngicos, bacterianos, etc., que imparten color. En cuanto a esta diferenciación de pigmentos naturales y sintéticos, los primeros no suelen ser muy estables a procesamiento; por otra parte, los sintéticos sí son medianamente más estables al procesamiento, imparten mayor claridad en el color, así como homogeneidad entre lotes, son considerablemente de menor costo, y carecen de olor y sabor. Cabe resaltar que algunos pigmentos funcionan como provitaminas, pudiendo presentar una capacidad antioxidante, por lo que su consumo tiene beneficios a la salud. Asimismo, de acuerdo con diversos autores (**Clement et al., 1994; Badui, 2006; Damodaran et al., 2007; Mérillon & Ramawat, 2019**), existen gran variedad de pigmentos presentes en alimentos como antocianinas (rojo-azul-morados), carotenoides (amarillo-naranja-rojos), clorofilas (verdes), betalaínas (betacianinas rojo-violeta, y betaxantinas amarillas), hemopigmentos (como mioglobina y hemoglobina), flavonoides, xantonas, entre otros, donde su presencia depende directamente de la capacidad de síntesis de estos compuestos con capacidad colorante por el organismo.

Los **antioxidantes** se pueden definir como “sustancias que tienen la capacidad de retardar o prevenir la oxidación en presencia de oxígeno, es decir, que son capaces de contrarrestar los efectos nocivos de los radicales...” (**Calvo et al., 2011, p. 397**), pudiendo ser estos obtenidos a través de la dieta (exógenos) o por síntesis del organismo (endógenos) (**Calvo et al., 2011**). Dicho de otra manera, los antioxidantes son aquellos compuestos químicos que a bajas concentraciones previenen o retrasan la oxidación de un sustrato (en este caso de alimentos), o bien, de componentes fácilmente oxidables, como son los lípidos. Así, estos antioxidantes

son aquellos compuestos que contribuyen a la capacidad antioxidante, tratándose principalmente de pigmentos y polifenoles (compuestos fenólicos) (Shalaby, 2019). La forma en la que estos compuestos actúan aún no se ha definido claramente, pero mediante una serie de interacciones entre pigmentos como carotenoides, algunas enzimas dependientes de algunos iones metálicos, tocoferoles (vitamina E), ácido ascórbico (vitamina C), y especialmente los compuestos fenólicos, se llevan a cabo en forma cíclica (regeneración de estos compuestos) y evitando la oxidación de los componentes alimentarios por radicales (Badui, 2006; Damodaran *et al.*, 2007). Así, estos antioxidantes se pueden clasificar en primarios [detienen la cadena de propagación oxidativa provocada por la formación de radicales (Figura 4), interactuando directamente con estos (Figura 5)] y secundarios (preventivos, como desactivación de metales, inhibición enzimática oxidativa, regeneración de antioxidantes primarios, y eliminación de oxígeno singulete) (Shalaby, 2019).

La importancia de estudiar la capacidad antioxidante de los alimentos radica en la prevención de daño celular en sus componentes constitutivos, como del material genético (DNA) y mantener la integridad de otras estructuras celulares de importancia (proteínas, enzimas, lípidos, etc.), conociendo qué alimentos presentan en qué magnitud dicha capacidad antioxidante para la elaboración de productos y dietas saludables (Damodaran *et al.*, 2007; Shalaby, 2019). Tradicionalmente, estos compuestos se han caracterizado y extraído para su uso en diferentes alimentos para la protección contra la oxidación, especialmente de lípidos, así como de proteínas y algunos otros compuestos de importancia biológica (Nielsen, 2017).

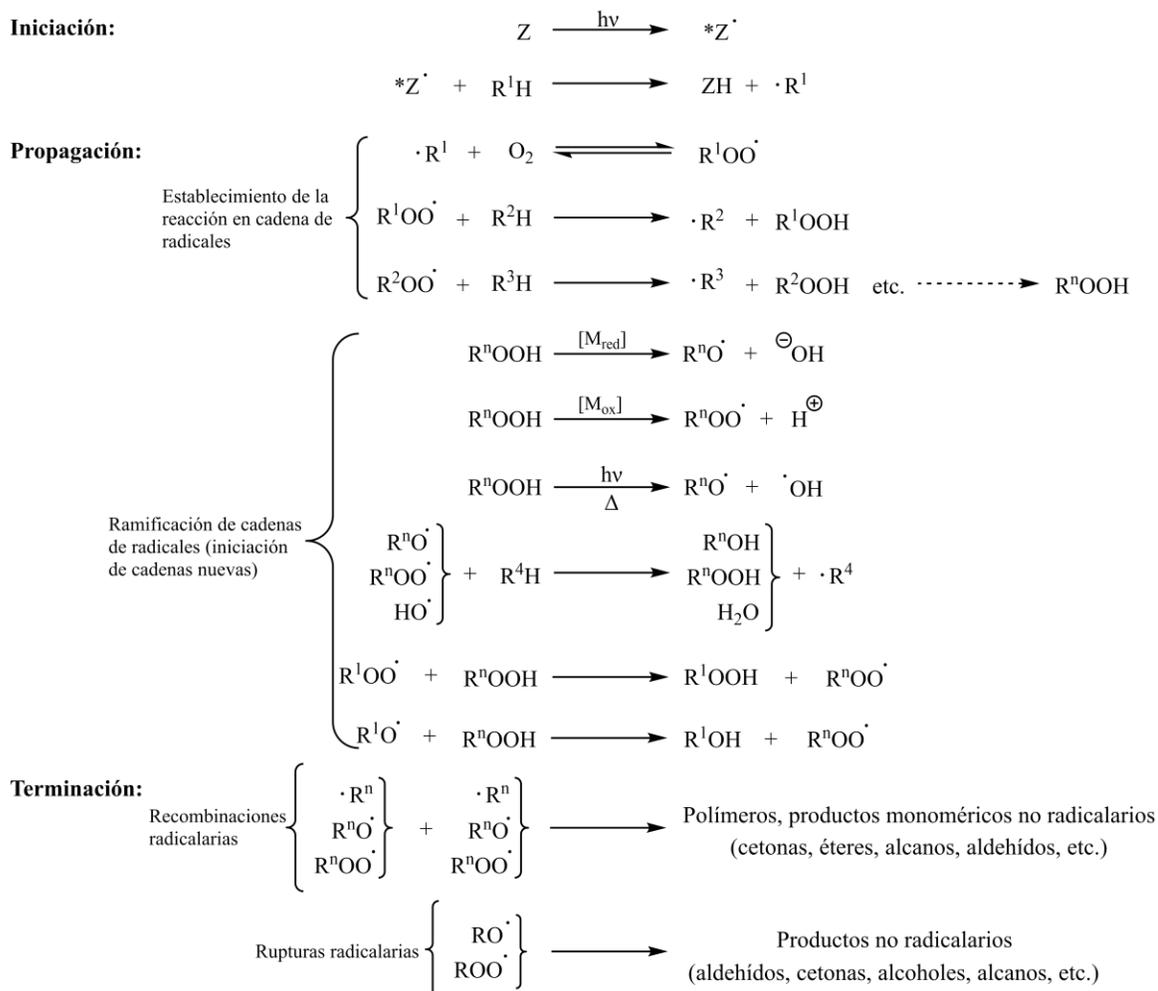


Figura 4. Mecanismo de la reacción en cadena clásica de radicales en la oxidación lipídica (lipooxidación) con propagación mediante una serie de abstracciones de hidrógeno.

Fuente: Adaptado y modificado de **Schaich (2005)**.

*: estado excitado; **Z**: iniciador radicalario; **R**: cadena alifática o sustituyente (lipídica, de manera general).

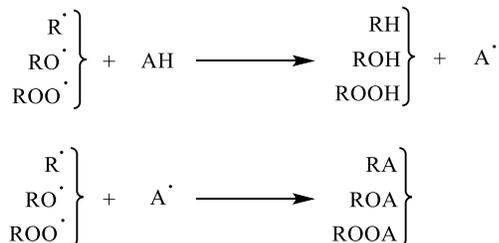


Figura 5. Mecanismo general de acción de antioxidantes primarios, interrumpiendo la cadena de propagación radicalaria.

Fuente: Adaptado y modificado de **Gordon (1990)**.

A: compuesto antioxidante; **R**: cadena alifática o sustituyente (lipídica, de manera general).

A lo largo de la historia humana se han consumido diversos alimentos gracias a sus propiedades benéficas (como la tuna), siendo algunas de estas provocadas por los compuestos antioxidantes (COMETUNA *et al.*, 2009; González & Vela, 2010; Dasgupta & Klein, 2014). Los compuestos fenólicos, por ejemplo, han sido utilizados como antioxidantes pues inhiben principalmente la propagación de radicales, evitando que generen otras reacciones de oxidación en el organismo (Pereira *et al.*, 2015), siendo añadidos en alimentos.

La *actividad antioxidante* se refiere a una constante de velocidad (medida a través de pruebas cinéticas) de la reacción entre reactivos (antioxidantes o radicales) específicos; mientras que la *capacidad antioxidante* (también llamada poder antioxidante) se refiere a una medida de la cantidad de radicales neutralizados por una muestra (como conjunto), provocada por la acción de una mezcla heterogénea de compuestos con dicha propiedad contra los radicales, en un alimento, manifestando un efecto preventivo sobre algunas enfermedades cardiovasculares o cáncer, entre otras (Zavaleta *et al.*, 2005; Bunaciu *et al.*, 2015).

2.4.1. Betalaínas

Las **betalaínas** son un grupo de pigmentos hidrosolubles, tratándose de glucósidos, estructuralmente hablando, las cuales se dividen en dos principales clases (mencionadas anteriormente): betacianinas y betaxantinas. Se ha determinado que estos pigmentos solamente se encuentran en 10 familias vegetales, siendo una de estas en las *Cactaceae* (en tunas rojas), así como en algunas familias fúngicas. Una característica importante de estos pigmentos es que no son afectados por el pH como sí lo son las antocianinas. En la naturaleza, las betalaínas se encuentran como zwitteriones, estructuras químicas, generalmente orgánicas, con al menos una carga negativa y una carga positiva (**Badui, 2006; Damodaran et al., 2007; Harris, 2016; Villaño et al., 2016**). También, se ha encontrado que, si una especie vegetal contiene betalaínas, no contendrá antocianinas, y viceversa (**Badui, 2006; Damodaran et al., 2007**). De acuerdo con **Reynoso et al. (1997)** y **Badui (2006)**, en las tunas del cactus *O. ficus indica*, una de las betalaínas presentes (betaxantina) principales es la indicaxantina.

En el caso de las betacianinas, estas contienen un grupo ciclo-dopa (derivado del grupo indol), debido al cual se debe principalmente la tonalidad roja-violeta que presentan (**Mériillon & Ramawat, 2019; Damodaran et al., 2007**). Las betacianinas poseen a la betanidina y a la isobetanidina (**Figura 6**), las cuales son los aglucones (estructura principal separada de carbohidratos) más importantes (**Badui, 2006**). Asimismo, en las betacianinas los azúcares más comúnmente presentes son la glucosa, soforosa y ramnosa; siendo la más abundante la 5-O- β -glicosilbetanidina (**Badui, 2006; Damodaran et al., 2007**).

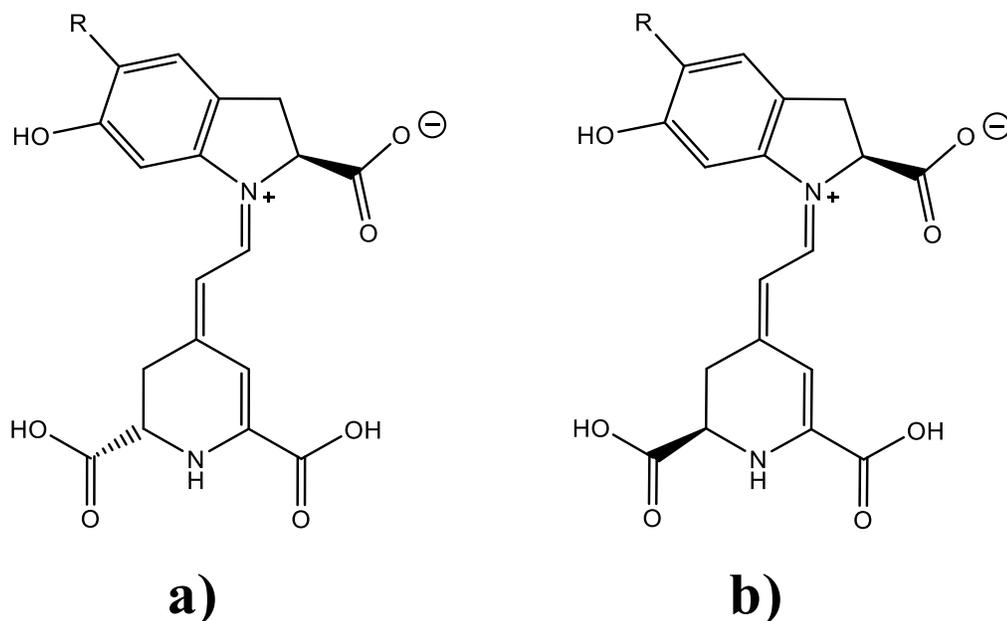


Figura 6. Estructura química de algunas betacianinas, **a)** betanidina (R = OH), betanina (R = Glucosa), e amarantina [R = (ácido 2'-glucurónicil)glucosa]; y **b)** isobetanidina (R = OH), isobetanina (R = Glucosa), e isoamarantina [R = (ácido 2'-glucurónicil)glucosa].

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, las betaxantinas (amarillas) se diferencian de las betacianinas pues poseen aminoácidos en vez del grupo indol. Algunas de las betaxantinas más importantes, como se pueden ver en la **Figura 7**, son la indicaxantina, y la vulgaxantina I y II. A pesar de que se han llegado a caracterizar una poca cantidad de betaxantinas, debido a que se conocen gran cantidad de aminoácidos, se cree que pueden existir gran variedad de estos pigmentos en la naturaleza, más aún con los sintéticos (**Badui, 2006; Damodaran et al., 2007; Mérillon & Ramawat, 2019**).

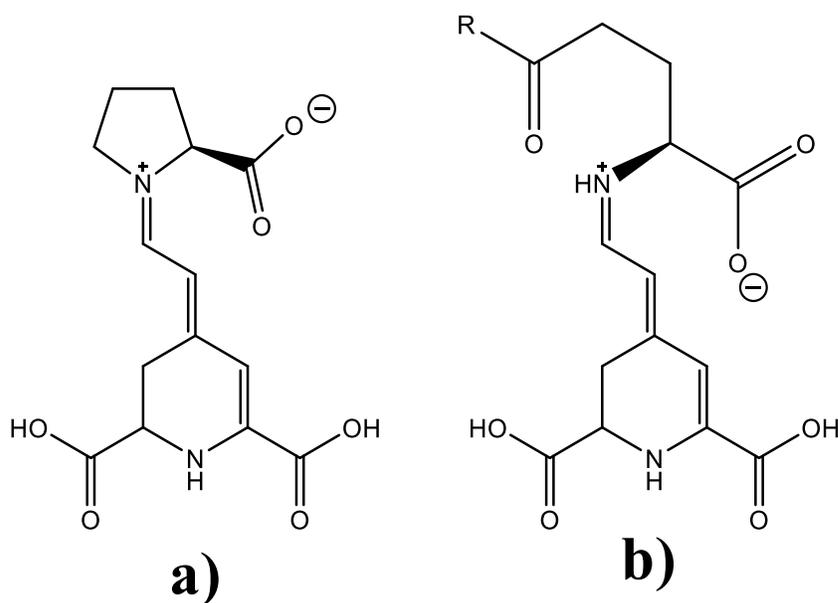


Figura 7. Estructura química de algunas betaxantinas, **a)** indicaxantina; y **b)** vulgaxantina-I (R = NH₂), y vulgaxantina-II (R = OH).

Fuente: Elaboración propia.

2.4.2. Carotenoides

Los **carotenoides** son de los pigmentos más abundantes en la naturaleza, presentes principalmente en vegetales y animales, así como en algas, entre otros reinos, que tienen tonalidades desde amarillo hasta rojo intenso. De hecho, constantemente este pigmento es enmascarado por la clorofila en las plantas, por lo que, durante el otoño, en la senescencia vegetal, los carotenoides son más evidentes. En muchos reinos este pigmento es sintetizado, pero en animales, por ejemplo, se obtiene a través de la ingesta (**Bauernfeind, 1972; Badui, 2006; Damodaran et al., 2007; Aluko, 2012**). Una de sus funciones principales es durante la fotosíntesis, atrapando la radiación electromagnética proveniente del Sol (secundario a la clorofila), además de su actividad antioxidante en tejido. Adicionalmente, muchos de estos carotenos tienen actividad de provitamina A (**Figura 8**) (**Badui, 2006; Damodaran et al., 2007**).

Los carotenos se tratan de polienos, cadenas largas con enlaces dobles conjugados, dividiéndose principalmente en dos grupos: carotenos (alifáticos) y xantofilas (oxigenadas). En

el caso de los dobles enlaces, se pueden encontrar con configuración tanto E como Z, teniendo gran variedad de compuestos. Asimismo, puede ser acíclicos, o ciclados en uno o ambos extremos de la cadena. Como se puede observar en la **Figura 9**, las xantofilas pueden contener oxígeno en forma de grupos hidroxilo, epoxi, aldehído o cetona en su estructura (**Badui, 2006; Damodaran et al., 2007; Aluko, 2012; Mérillon & Ramawat, 2019**).

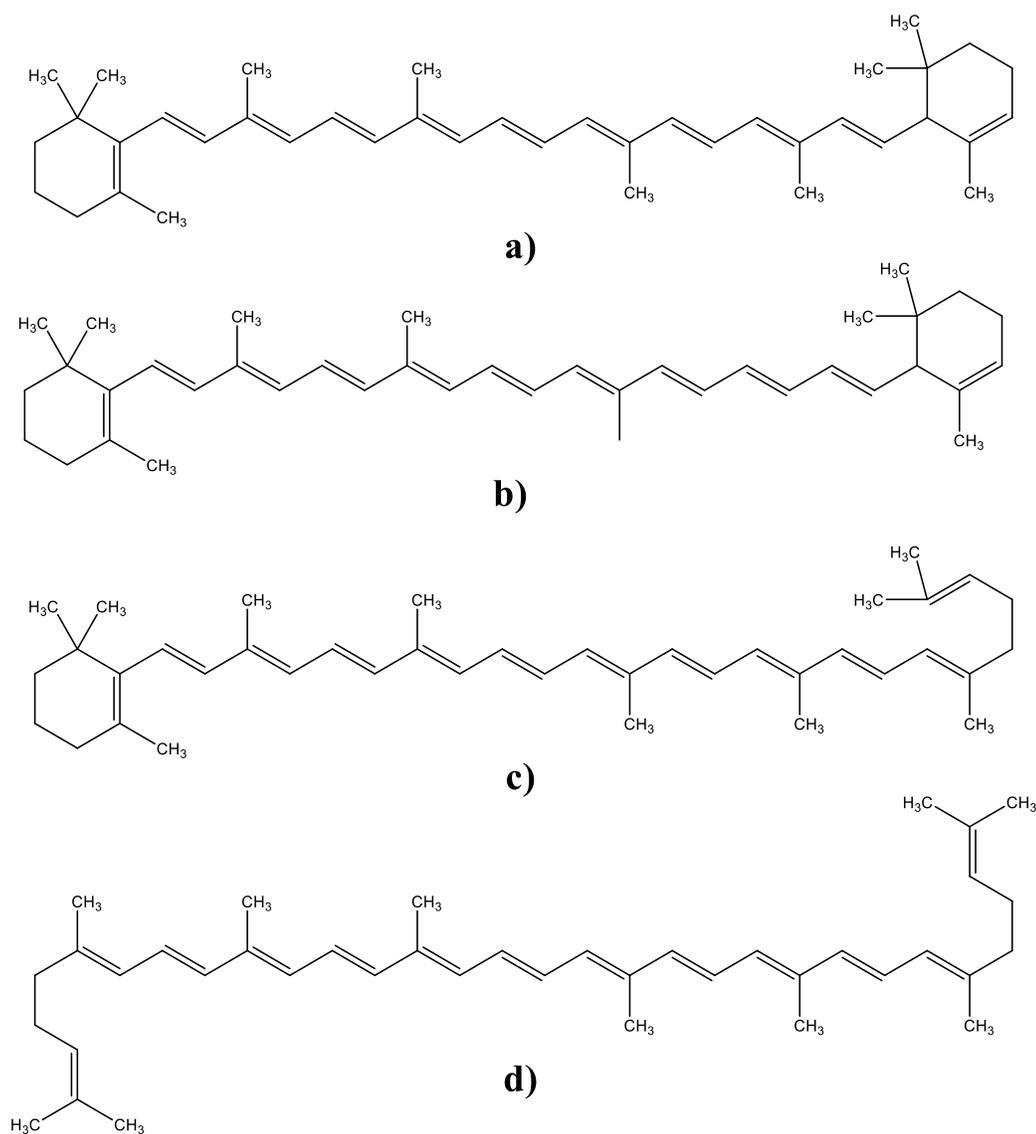


Figura 8. Estructura química de algunos carotenos, **a)** α -caroteno, **b)** β -caroteno, **c)** γ -caroteno y **d)** licopeno.
Fuente: Elaboración propia.

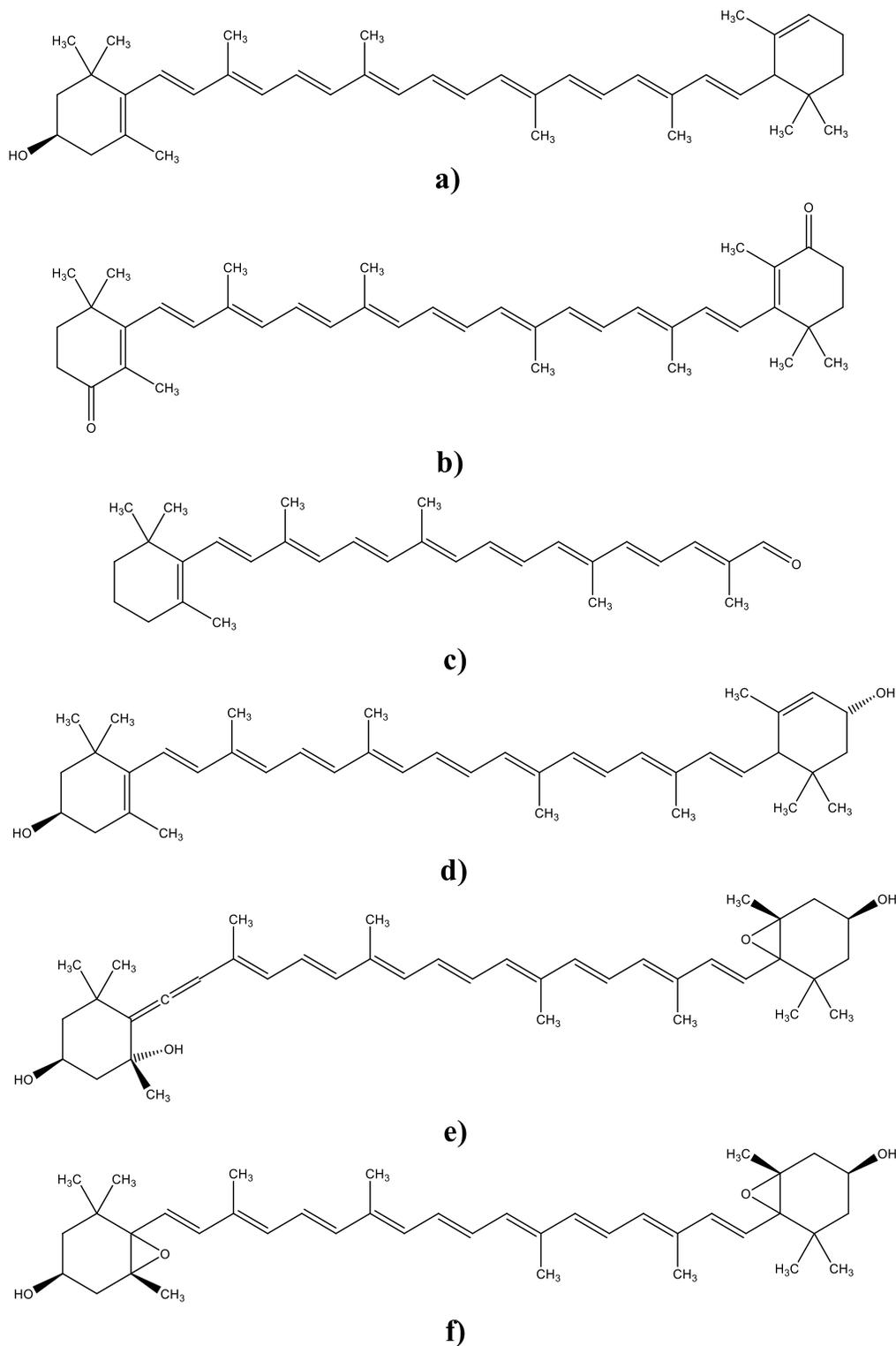


Figura 9. Estructura química de algunas xantofilas, **a)** β -criptoxantina, **b)** cantaxantina, **c)** β -apo-8'-carotenoal, **d)** luteína, **e)** neoxantina y **f)** violaxantina.

Fuente: Elaboración propia.

2.4.3. Clorofila

La **clorofila** es un pigmento natural presente en todas las plantas que realizan fotosíntesis, encontrándose principalmente en este reino, pero también en algas, y algunas bacterias (**Damodaran *et al.*, 2007**). Como se mencionó anteriormente, existen algunos compuestos químicos capaces de absorber la energía lumínica proveniente del Sol, y la clorofila es el principal compuesto para realizar esta actividad metabólica en plantas, y es debido a este pigmento que se emiten las tonalidades verdes en vegetales. Este pigmento generalmente se encuentra presente en las hojas de las plantas, pero también en frutos inmaduros, que se tornan de otras tonalidades dependiendo de la especie y predominancia de distintos pigmentos. El contenido de este pigmento en hojas verdes de algunas plantas se encuentra aproximadamente en 0.1 % en base húmeda (%_{bh}) (**Humphrey, 1980; Badui, 2006; Mérillon & Ramawat, 2019**).

Estructuralmente, la clorofila es un complejo de un macroanillo aromático de tetrapirrol llamado porfirina, con un ion metálico divalente, el magnesio; y este es el núcleo de la clorofila, especialmente donde se da la absorción de luz solar. Existen varias denominaciones para la estructura de la clorofila, por ejemplo, la clorofila sin cadena lateral ni ion metálico se denomina feoforbido. La cadena lipofílica que se une en la parte inferior de la estructura de la clorofila se denomina fitol (**Figura 10c**). La clorofila sin fitol se denomina clorofilida (**Figura 10b**), y la clorofila sin magnesio se denomina feofitina. Asimismo, existen varias estructuras caracterizadas para la clorofila (**Figura 10a**), donde se han reportado la a, b, c, d, e, y bacterioclorofilas, siendo las clorofilas a y b las más comúnmente encontradas y cuantificadas en vegetales, encontrándose en la mayoría de las plantas en una relación 3:1 (a:b). (**Humphrey, 1980; Badui, 2006; Damodaran *et al.*, 2007; Mérillon & Ramawat, 2019**).

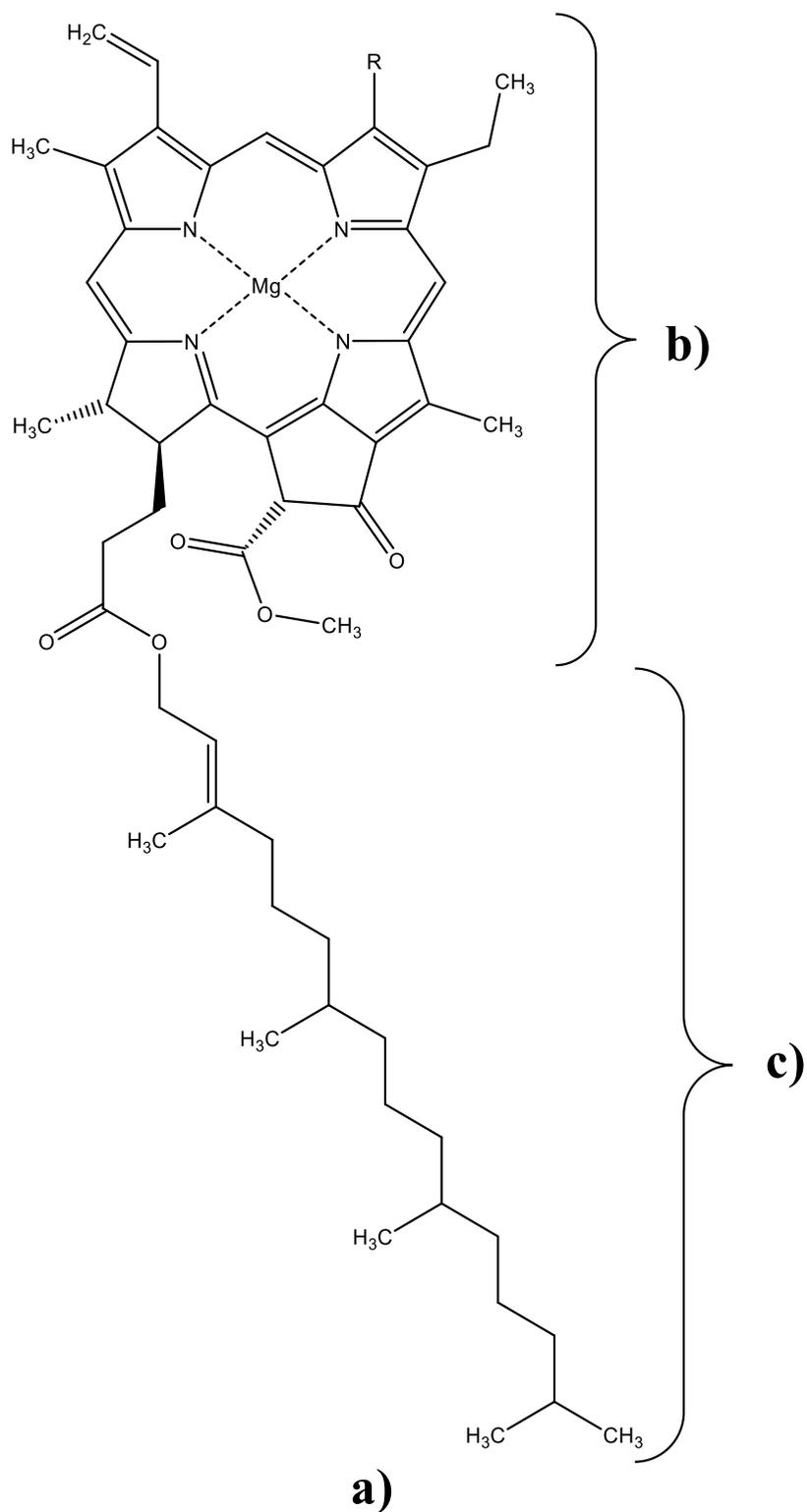


Figura 10. Estructura química de la clorofila **a)** clorofila a (R = CH₃) y clorofila b (R = CHO); **b)** clorofilida; y **c)** fitol.

Fuente: Elaboración propia.

2.4.4. Compuestos fenólicos

Los **polifenoles** son compuestos químicos orgánicos conformados por múltiples anillos fenólicos (anillos fenilo con grupos hidroxilo) unidos en su estructura, encontrándose en muchas ocasiones en las plantas como flavonoides, compuestos de relativo bajo peso molecular e hidrosolubles si cuentan con grupos hidroxilo y glicosilo (carbohidratos simples, generalmente monosacáridos) en sus estructuras (**Aluko, 2012; Nielsen, 2017**). Estos compuestos son de gran importancia para la alimentación humana gracias a múltiples propiedades atribuidas, siendo de las más importantes la actividad antioxidante (**Badui, 2006; Aluko, 2012**). Desde hace mucho tiempo eran más conocidos por sus efectos adversos, como la pérdida de nutrientes gracias a que se unen a gran variedad de nutrimentos, haciendo complejos insolubles, y así disminuyendo su biodisponibilidad (**Damodaran et al., 2007; Aluko, 2012**), pero ya desde hace varios años se han demostrado más sus propiedades benéficas, reduciendo el riesgo de ciertas enfermedades, como la propiedad ya mencionada anteriormente, así como por sus propiedades de antienvjecimiento, anticancerígenas, antiinflamatorias, entre otras, con cierta moderación en el consumo (**Yao et al., 2004; Calvo et al., 2011; Aluko, 2012; Pereira et al., 2015**).

Existen fundamentalmente dos tipos de polifenoles: solubles e insolubles. Se ha demostrado que los polifenoles insolubles protegen de la oxidación a lípidos, proteínas y carbohidratos durante la digestión para luego ser absorbidos, mientras que los polifenoles solubles son absorbidos directamente (**Aluko, 2012**). La gran mayoría de estos compuestos se obtienen únicamente a través de la dieta, y se ha observado (**Geil & Anderson 1994; Xu et al., 2007; Pereira et al., 2015**) que se encuentran principalmente en vegetales verdes. De esta manera, los principales compuestos responsables de la capacidad antioxidante de ciertos alimentos son los flavonoides, ácidos fenólicos y taninos (**Han et al., 2007; Brend et al., 2012; Pereira et al., 2015**).

2.4.4.1. Flavonoides

Los **flavonoides** son un tipo de pigmentos vegetales polifenólicos que se encuentran de forma natural en frutas y demás vegetales, de relativamente bajo peso molecular (**Martínez-Flórez *et al.*, 2002; Pereira *et al.*, 2015**). Esta familia de compuestos químicos comparte un esqueleto común (**Figura 11**) de tres anillos C6-C3-C6 conformado por dos anillos fenilo (A y B) unidos a un anillo pirano (C). Asimismo, como se puede observar en la **Figura 12**, estos pigmentos se pueden clasificar en 4 grupos de compuestos de acuerdo con su estructura química: flavanos (incoloros), flavonoles (amarillos pálidos y en ocasiones verdes pálidos), flavonas (amarillo pálido) y antocianidinas (azul-rojo-violeta). Como muchos compuestos fenólicos, se encuentran unidos a azúcares para su solubilidad en la célula vegetal, más frecuentemente a un azúcar: la D-glucosa; pero también con otros azúcares. Por esto, se encuentran en la naturaleza normalmente como O-glicósidos (mayor solubilidad en agua), y no como agliconas (insolubles en agua, forma libre sin carbohidratos unidos a su estructura) (**Martínez-Flórez *et al.*, 2002; Yao *et al.*, 2004**).

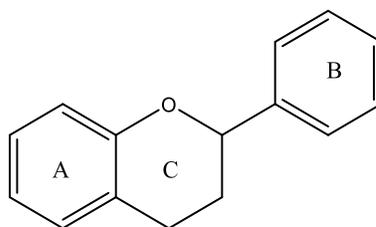


Figura 11. Estructura química básica de los flavonoides.
Fuente: Elaboración propia.

Los flavonoides pueden proteger a los tejidos vegetales (especialmente las hojas) contra el daño por radiación UV (**Yao *et al.*, 2004**), y una particularidad de estos compuestos fenólicos es que actúan principalmente como agentes antivirales, antitumorales y antiinflamatorios, así como contra enfermedades cardiovasculares; actuando principalmente contra agentes reductores, incluyendo a los radicales, estimulando la capacidad antioxidante de ciertas enzimas e inhibiendo la acción de otras. Estos compuestos son los que mayor influencia tienen sobre la capacidad antioxidante de un alimento. La única manera de obtención para el ser humano es mediante la dieta de vegetales que contengan estos pigmentos (**Yao *et al.*, 2004; Pereira *et al.*, 2015**). Se han identificado más de 5,000 flavonoides en la naturaleza

(Ross & Kasum, 2002; Behling *et al.*, 2004; Yao *et al.*, 2004), y uno de los flavonoides más abundantes en frutas y otros vegetales es la quercetina (Figura 12b), el cual es un flavonoide (flavonol) amarillo-verdoso que se puede encontrar con abundancia en cebolla, manzana, brócoli, jitomate, moras, cereza, uva, repollo rojo (Martínez-Flórez *et al.*, 2002; Yao *et al.*, 2004) y en tuna (Stintzing *et al.*, 2001). Asimismo, diversos autores (Martínez-Flórez *et al.*, 2002; Behling *et al.*, 2004; Yao *et al.*, 2004; Pereira *et al.*, 2015) han reportado la presencia de estos los flavonoides en diversos alimentos, e incluso se ha cuantificado el contenido de estos compuestos en alimentos que se consumen frecuentemente, se encontró esta cantidad al día de 44 mg en cereales, 45 mg en otros granos y nueces, y 126 mg en vegetales y hierbas, así como en té verde, té negro (quercetina en infusiones de 10–25 mg/L), cacao, café, soya, cebolla, manzana, pimienta negra, otras frutas y jugos (290 mg·día⁻¹) y algunas bebidas alcohólicas como la cerveza y el vino (aproximadamente 420 mg·día⁻¹), extractos de plantas como arándano, cardo, mariano, entre muchos otros.

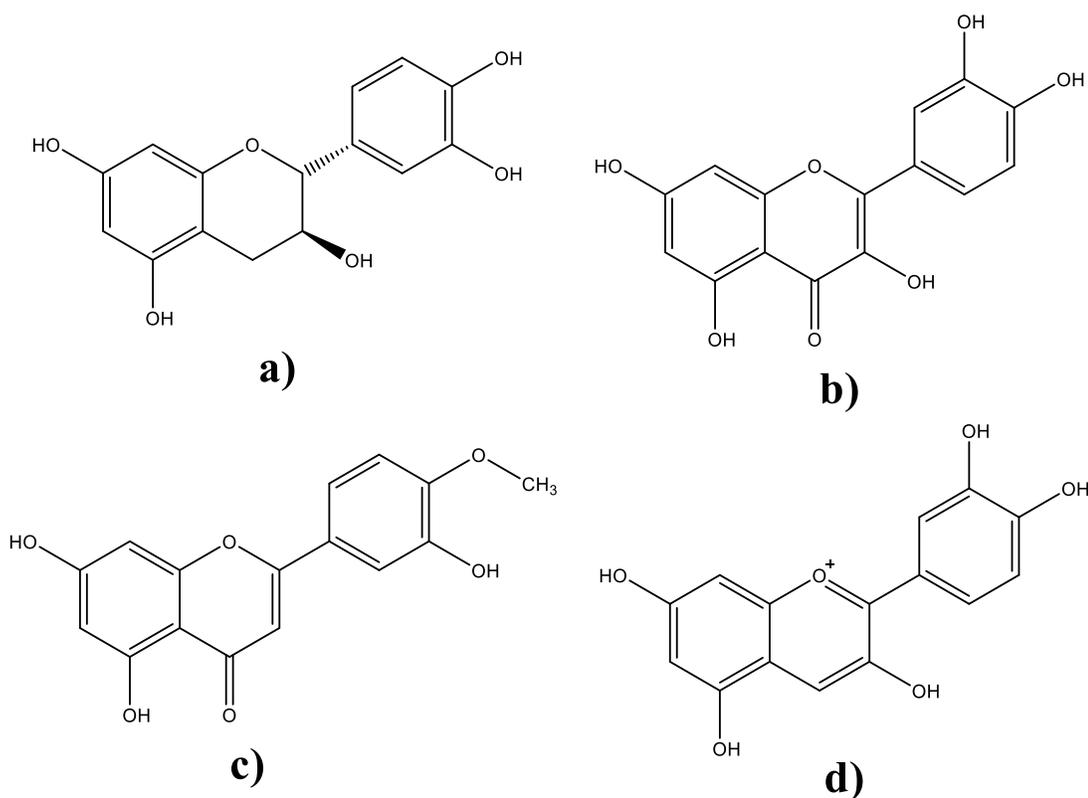


Figura 12. Estructura química de algunos flavonoides (agliconas): **a)** flavano (catequina), **b)** flavonol (quercetina), **c)** flavona (diosmetina), y **d)** antocianidina (cianidina).

Fuente: Elaboración propia.

2.5. Análisis instrumental de color

Como se ha mencionado anteriormente, la calidad de los alimentos está influenciada, además de otras propiedades como el olor, sabor y textura, inicialmente por el color (aparición) de dicho alimento pues está relacionado con la madurez y frescura, del mismo (**Badui, 2006; Damodaran et al., 2007; Severiano-Pérez, 2019; Severiano-Pérez et al., 2019**), pudiéndose incluso diferenciar entre productos naturales o artificiales (procesados). El color es una característica en la materia directamente relacionada con el espectro de la luz visible (780 – 380 nm para el humano), por lo que puede ser medido (**Badui, 2006**).

Los instrumentos de medición de color que están basados en cómo el ser humano percibe los colores contienen una fuente de luz, la cual incide contra el objeto a evaluar, provocando la reflexión de dicha radiación electromagnética en ciertas longitudes de onda que pueden ser fácilmente cuantificables (**Hutchings et al., 2013; Rodríguez, 2022**).

En la actualidad se han desarrollado diversos instrumentos para medición del color en distintos sistemas del espacio de color, siendo unos de los principales el CIELab (**Commission Internationale de l’Eclairage [CIE], 2004; Hutchings et al., 2013; Rodríguez, 2022**). De acuerdo con **Beetsma (2020)**, el color de objetos se encuentra en el espacio de color CIELab (1976) (**CIE, 2004**), donde se cuantifica. Este espacio de color se construye en tres ejes perpendiculares entre sí, siendo un espacio tridimensional (**Figura 13**). Así, el eje L* da la luminosidad del color, con un valor de 0 (negro) a 100 (blanco). Los colores “reales” se encuentran en los dos ejes horizontales a* y b*. El eje a* va de verde (-a*) a rojo (+a*), y el eje b* va de azul (-b*) a amarillo (+b*) (**Hutchings et al., 2013; Beetsma, 2020**). De esta manera, el color representa un punto en un espacio tridimensional con coordenadas (L*, a*, b*). Así, las mediciones de cierto color se hacen siempre con referencia a un estándar blanco (definido así por su luminosidad) (**CIE, 2004; Hutchings et al., 2013; Rodríguez, 2022**). El parámetro *Chroma* (C*) es la saturación de un color, siendo más brillante y claro cuanto mayor el valor de C*, y más apagado y pastel (yéndose al gris) cuanto menor sea este valor.

Así, este parámetro es la distancia del color (coordenada) al eje L^* . Por otro lado, el parámetro *hue* (h) es el tono o matiz del color (Beetsma, 2020). En la **Figura 14** se muestra la dirección en la que se mueve el matiz del color de acuerdo con el ángulo dentro del plano.

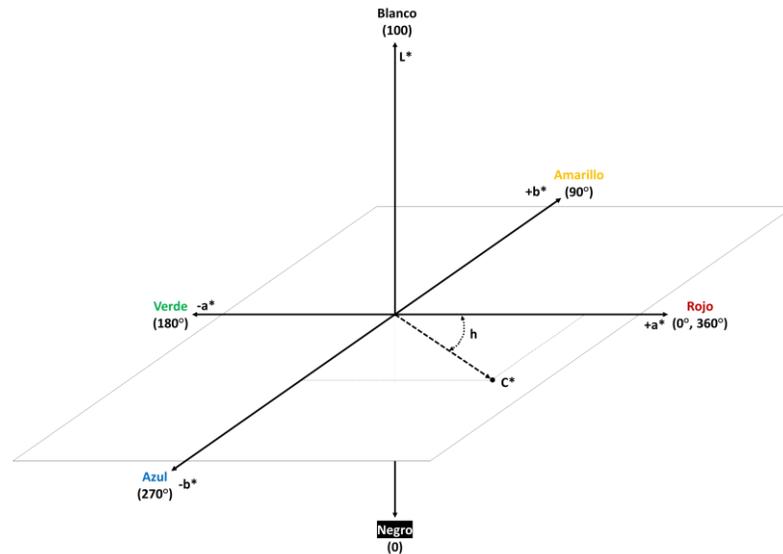


Figura 13. Diagrama tridimensional del espacio CIELab del color.
Fuente: Elaboración propia.

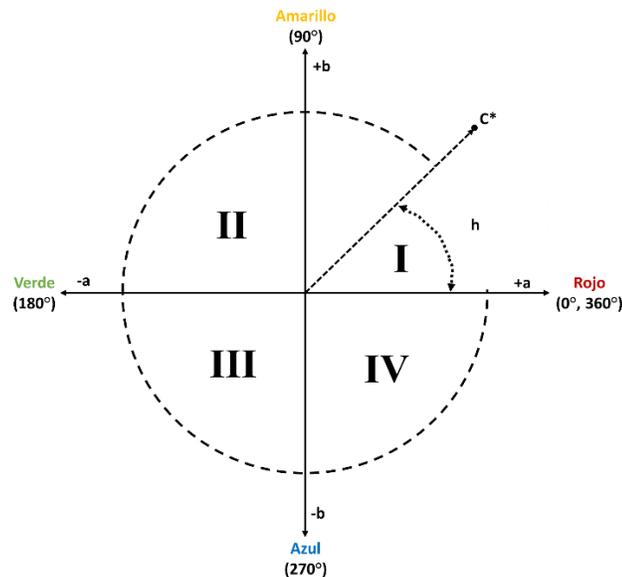


Figura 14. Diagrama del sistema CIELab mostrando solamente el plano a-b.
Fuente: Modificado de McLellan *et al.* (1995).

Asimismo, de acuerdo con **Pop et al. (2010)**, un valor de ΔE^*_{ab} (diferencia generalizada entre dos colores en el sistema CIELab) mayor a 0.5 tiene influencia en la percepción de color. Además, el ΔE^*_{ab} indica la medida numérica en la diferencia entre dos colores, pero no te dice de qué forma lo son (**Konica Minolta, 2007**). No obstante, cuanto mayor sea el valor de ΔE^*_{ab} , mayor diferencia hay entre dos colores.

De acuerdo con **Konica Minolta (s.f.)**, “la diferencia entre colores se define como la comparación numérica de una muestra con el estándar [...]. Utilizando las diferencias en luminosidad (ΔL^*), saturación (ΔC^*), y matiz (ΔH^*_{ab}), pudiendo ser positivas (+) o negativas (-)”. Esto quiere decir que una diferencia positiva en la luminosidad indica que el color muestra es más claro que el estándar (o bien, otra muestra), y si esta diferencia es negativa, más oscuro el color muestra; si la diferencia es positiva en la saturación, el color muestra es más brillante, y si esta diferencia es negativa, más opaco el color muestra; finalmente, el matiz indica una diferencia en el color en sí (**Figura 15**) dentro de este espacio, aunque en este parámetro una diferencia positiva indica el cambio del color en sentido antihorario, mientras que si la diferencia es negativa, esto indica un cambio de color en sentido horario (**Konica Minolta, s.f.; Nielsen, 2017**).

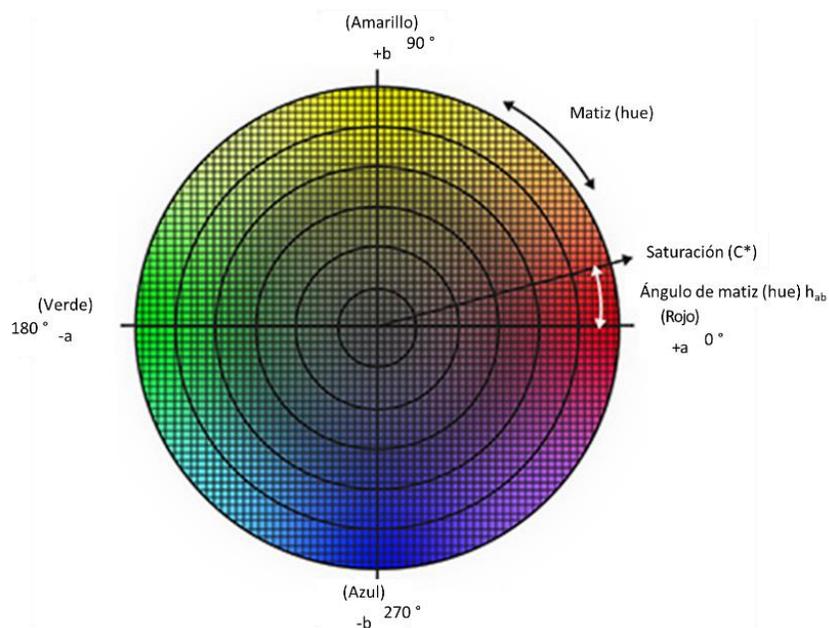


Figura 15. Diagrama a color del sistema CIEL*a*b* mostrando solamente el plano a-b.
Fuente: Adaptado de **Konica Minolta (s.f.)**.

2.6. Análisis instrumental de textura

La habilidad del cuerpo humano para sentir movimientos (cinestesia) se da gracias a propiedades mecánicas y por la estructura interna del alimento percibidas por los músculos. Por otro lado, la detección de las propiedades táctiles (somestesia) se da por la percepción en boca (y manos) de la estructura superficial del alimento (**Tunick, 2011**). El estudio de textura ha sido estudiado desde el fin del siglo XIX e inicios del siglo XX (**Bourne, 1982; Szczesniak, 2002**), y se han desarrollado una gran variedad de metodologías y técnicas de medición instrumental de esta característica de los alimentos. Así, estas técnicas instrumentales pueden recopilar e identificar una gran variedad de características mecánicas de alimentos (**Rodríguez, 2022**). Si se miden estas propiedades texturales en alimentos a distintas etapas de desarrollo e incluso almacenamiento (postcosecha) como en frutos, por ejemplo, se busca asegurar que el alimento alcance y, de ser posible, supere las expectativas del consumidor (**Lu, 2013**). Sin embargo, también se puede evaluar la textura de otro tipo de productos, por ejemplo, de la industria cosmética.

Así, se ha llegado a la definición de textura en alimentos, siendo que “la textura es la manifestación sensorial y funcional de las propiedades estructurales, mecánicas y superficiales de los alimentos detectadas a través de los sentidos de la vista, oído, tacto y cinestesia” (**Szczesniak, 2002, p. 215**). Esto implica, entre otros conceptos, que, al tratarse de una característica sensorial, el ser humano es prácticamente el único capaz de percibir y describir dichas propiedades. Asimismo, **Bourne (2002: citado por Lu, 2013, p. 104)** menciona que “las propiedades texturales de un alimento son ese grupo de características físicas que surgen de los elementos estructurales del alimento, son percibidas principalmente por la sensación de tacto, relacionadas a la deformación, desintegración, y flujo del alimento bajo una fuerza, y son medidos objetivamente por funciones de masa, tiempo, y distancia”.

Sin embargo, las características mecánicas no necesariamente proveen una visión completa de las características texturales de los alimentos a pesar de sí estar relacionadas con esta. A pesar de esto, son ampliamente utilizados en la industria alimentaria e incluso en

investigación, ya que estos sí proveen información suficiente para la generación de criterios. De esta manera, estos parámetros texturales se correlacionan con atributos sensoriales mediante métodos estadísticos específicos (véase la **2.8. Análisis de Procrustes Generalizado**) ya que la percepción oral de los alimentos sí es sustancialmente distinta a las mediciones instrumentales de esta debido a que el ser humano evalúa múltiples características simultáneamente, a diferencia de los métodos instrumentales, por lo que deben ser interpretados en términos sensoriales (**Szczesniak, 2002; Nishinari, 2004; Tunick, 2011; Kilcast, 2013; Rodríguez, 2022**).

Asimismo, diversos autores (**Brezmes, 2001; Escobedo, 2012; Huang *et al.*, 2022**), han mencionado que la textura de los frutos está altamente influenciada por su estado de maduración, donde la dureza/firmeza tanto en la cáscara como la pulpa indican el estado de madurez. Cuanto mayor sea el estado de maduración de los frutos, menor será la dureza en cáscara, siendo más blandos; y los frutos más jóvenes, o menos maduros, siendo más duros. Aunque de manera general la firmeza de un fruto se debe al tamaño de las células, forma y empaquetamiento (acomodo), grosor y fuerza (composición) de la pared celular, así como la extensión por la adhesión intercelular. Este proceso de pérdida de textura en frutos se debe a diversos factores, como los cambios en la composición de la pared celular: la degradación de los biopolímeros vegetales, principalmente polisacáridos como celulosa, hemicelulosa, así como algunas pectinas. Al madurar el tejido y particularmente al llegar a la senescencia vegetal, diversas enzimas degradan estos biopolímeros, reduciendo la fuerza de la pared celular, resultando en la pérdida de firmeza, y liberación de azúcares (influyendo, a su vez, en el dulzor) (**Toivonen & Brummell, 2008; Van Buggenhout *et al.*, 2009; Martínez-González *et al.*, 2017**). Un ejemplo de esto es el plátano, donde el fruto se encuentra duro y ácido cuando se encuentra en desarrollo, pero cuando llega a la madurez de consumo se vuelve dulce y blando (así como con cambio de color más oscuros), siendo más evidentes estas características conforme sigue madurando.

2.6.1. Punción

La prueba de punción mide, de forma directa, la fuerza requerida para una sonda (generalmente en aguja) para penetrar en un alimento con una profundidad definida previo al análisis, por lo que se trata de un método destructivo de análisis de textura. Así, esta prueba implica dos operaciones: la compresión y el corte de la muestra. Por supuesto, la medición de textura por este método está influenciada por diversos factores como son la cantidad y tipo de sonda (tamaño y forma) así como de la muestra, tipo de alimento a evaluar, velocidad de ensayo, la fuerza aplicada por la sonda, entre otros (**Lu, 2013**).

En este tipo de prueba se obtienen gráficos en curvas de fuerza-tiempo para la obtención de valores de fuerza máxima (punto máximo). Dependiendo de la fuerza, pero más aún de la distancia seleccionadas para la prueba, se ha visto que, por ejemplo, en frutos se pueden obtener más de un valor de fuerza máxima, tratándose el primero de la cáscara o piel, y el segundo de la pulpa. Así, se han determinado hasta tres puntos de fuerza máxima, siendo el tercero un centro o corazón con mayor dureza que el resto de la pulpa (**Ourecky & Bourne, 1968: citados por Breene, 1975; Escobedo, 2012**), como algunos otros comportamientos modificando las condiciones mencionadas anteriormente.

2.6.2. Prueba de corte (“Shear test”)

El cortado o cizallamiento, comúnmente referido como “shear” por su nombre en inglés, se refiere a la aplicación de fuerza para provocar el corte de un objeto provocando su división en (al menos) dos piezas separadas. Es por esto por lo que se trata de un método destructivo de análisis de textura. Las pruebas de corte o cizallamiento son utilizadas principalmente, y con gran utilidad, para alimentos musculares o fibrosos (Lu, 2013), particularmente en carne y frutos (pulpa). Uno de los métodos más usados en este tipo de prueba es mediante la prueba de corte de Kramer (KST por sus siglas en inglés) para la medición mecánica de dureza o firmeza, generalmente en muestras a granel (Christofi *et al.*, 2020), aunque también pudiéndose aplicar en frutos enteros, dependiendo del tamaño.

En este tipo de prueba se obtienen gráficos en curvas de fuerza-tiempo, generalmente para la obtención de valores de fuerza máxima (punto máximo superior, como kg o N) y de trabajo (área bajo la curva, como kg·s o N·s), sin embargo, se ha visto que los valores de fuerza máxima son suficientes para la determinación del parámetro de estudio en esta prueba: la dureza (a veces referida como firmeza) (Christofi *et al.*, 2020).

2.7. Evaluación sensorial

La Evaluación Sensorial (ES por sus siglas) es la ciencia de los sentidos, estudia cómo son percibidas las propiedades (llamados atributos) de los alimentos a través de los cinco sentidos. Surgiendo en la década de 1940, a partir de la necesidad de conseguir y mantener un nivel de calidad deseado en alimentos procesados, así como mantener un liderazgo contra otros productos similares en el mercado (**Severiano-Pérez *et al.*, 2019**). Es en esta industria de alimentos en la que la ES ha tenido un mayor desarrollo, pero también se ha desarrollado y sido de gran utilidad en otras industrias como la cosmética, farmacéutica, automotriz, hotelera, textil entre muchas otras (**García, 2016; Severiano-Pérez *et al.*, 2019**). Asimismo, como mencionan **Severiano-Pérez *et al.* (2019)**, esta ciencia se basa en otras ciencias, como son la fisiología, psicología, psicofísica, química y estadística, entre otras. De esta forma, la ES en alimentos se toma como parámetro de calidad y, en muchos casos, se utiliza como criterio para la liberación de un producto en proceso a producto terminado, así como para el desarrollo de un nuevo producto, lanzamiento al mercado y mejora continua (**Owusu-Apenten & Vieira, 2022**).

De esta manera, se ha definido a la ES como la ciencia o “... la disciplina científica utilizada para evocar, medir, analizar e interpretar estas respuestas a los productos percibidos a través de los sentidos de la vista, el olfato, el tacto, el gusto y el oído...” (**Stone & Sidel, 2004: citados por Severiano-Pérez, 2019, p. 49**). Así, la ES se centra en la precisión, exactitud y reproducibilidad de las metodologías elaboradas y así, dependiendo principalmente del objetivo del estudio, el tipo de metodología a utilizar. Con base en esto, se debe tener en cuenta el tipo de persona que participará en el estudio, ya sean jueces o panelistas entrenados (con un entrenamiento especializado) o consumidores (generalmente habituales del producto a evaluar, aunque no forzosamente), entre muchos otros factores a tomar en cuenta. Todas estas condiciones deben tomarse en cuenta pues las variables deben conocerse y aislarse para minimizar tal variabilidad, y que la variación presente se deba a los objetos de estudio (muestras), analizar con confiabilidad estadística (**Severiano-Pérez, 2019; Rodríguez, 2022**) y así poder contar con la credibilidad de los resultados obtenidos. Así, como indica **Rodríguez (2022)**, tanto el diseño experimental como el manejo o conducción de las pruebas sensoriales,

así como el análisis e interpretación adecuados de los resultados obtenidos es responsabilidad del analista sensorial (generalmente tratándose de un equipo y su líder).

2.7.1. Metodologías sensoriales

La ES se basa en un conjunto de técnicas y metodologías para la medición precisa de las respuestas sensoriales percibidas por el ser humano (principalmente) en alimentos (pudiéndose aplicar a una gran diversidad de productos dependiendo de los objetivos del estudio), minimizando el sesgo por cualquier información que pudiese tener influencia en el panelista o consumidor. Así, se espera que la información recabada a partir de las características sensoriales de los productos en evaluación sea de utilidad para los desarrolladores, científicos de alimentos y gerentes (Lawless & Heymann, 2010; Severiano-Pérez, 2019).

Existen dos tipos generales de metodologías sensoriales (Figura 16): analíticas (discriminativas o sensitivas, cuantitativas, y descriptivas) y afectivas (aceptación, nivel de grado, preferencia, entre otras) (Stone & Sidel, 2004; Ayala, 2016; Severiano-Pérez, 2019).

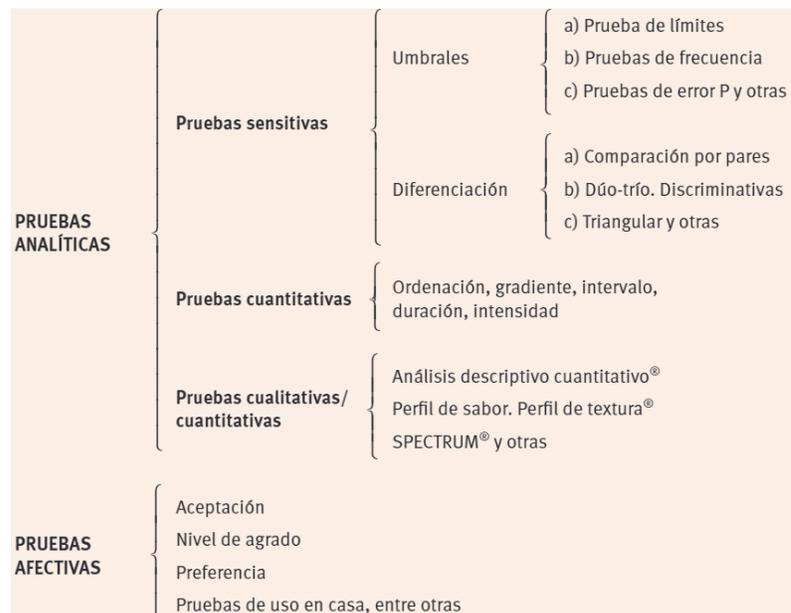


Figura 16. Clasificación general de las metodologías sensoriales.

Fuente: Severiano-Pérez (2019).

2.7.1.1. Metodologías analíticas

En el caso de las metodologías analíticas, estas están orientadas principalmente a estudiar los límites en que cierta característica de una muestra es percibida, las diferencias sensoriales perceptibles entre muestras, y la intensidad en la que dichas características (atributos) se encuentran en las muestras (**Severiano-Pérez, 2019**), es decir, cuantificar las características de los productos evaluados. Así, uno de los objetivos principales de la ES en alimentos a través de este tipo de metodologías está orientado a la descripción objetiva de las características percibidas a través de los sentidos. Algo importante a notar es que a pesar de tratarse de estudios cuantitativos, poseen un componente cualitativo (descripción de las sensaciones percibidas a través de los atributos o descriptores encontrados) junto con aquel cuantitativo (evaluación de la intensidad de los atributos del alimento), llevado a cabo por un panel de jueces (o bien, panelistas) entrenados (**ISO, 2016; Rodríguez, 2022**) en ciertos tipos de alimentos o productos, donde este entrenamiento dependerá tanto del tipo de prueba como de alimento (o producto) a evaluar (**Severiano-Pérez, 2019**).

Entre los métodos descriptivos más comunes se encuentran el Método de Perfil del Sabor (1940), Perfil de Textura (1963), Análisis Cuantitativo Descriptivo (QDA[®] por sus siglas en inglés; 1974), Método Spectrum[®] (1991), entre otros (**Carmona, 2013; Ayala, 2016; Severiano-Pérez et al., 2019**). Así, el análisis sensorial descriptivo tiene un amplio campo de aplicación, por ejemplo, para control de calidad, para la comparación de productos en la fase de pruebas piloto de un nuevo producto, detección de diferencias sensoriales por cambios en formulaciones, para la relación de parámetros fisicoquímicos con los atributos sensoriales, entre muchas otras aplicaciones (**García, 2016; Severiano-Pérez et al., 2019**).

2.7.1.1.1. Perfil Flash (Flash Profile)

También se han desarrollado metodologías descriptivas rápidas, las cuales requieren un menor tiempo para su realización y posterior análisis y, aunque sean metodologías flexibles, mantienen su naturaleza descriptiva (**Carmona, 2013; Ayala, 2016**). El primer método rápido desarrollado fue el Perfil de Libre Elección (Free Choice Profiling), desarrollado por **Williams & Langron (1984)**. Así, este método permite que el evaluador (generalmente consumidores) utilice cualquier cantidad de términos para poder describir y cuantificar los atributos de cierto producto basándose en la premisa que, a pesar de tratarse de una percepción del producto por parte del consumidor similar, este lo describe de forma distinta (**Murray et al., 2001; Vit et al., 2011: citados por Severiano-Pérez et al., 2019**).

El Perfil Flash o Flash Profile (FP por sus siglas en inglés) se trata de una técnica desarrollada por **Dairou & Sieffermann (2002)** basado en el Perfil de Libre Elección. Desarrollado en un inicio como un método flexible para obtener rápidamente el posicionamiento de un producto específico en una serie de productos similares (**Dairou & Sieffermann, 2002**). Así, en una primera etapa cada panelista recibe un conjunto de productos (o uno solo) para que generen una serie de descriptores sensoriales característicos del producto, de forma individual, evitando aquellos descriptores hedónicos. Tras la generación de todos los atributos posibles para cada serie de productos (o producto), se lleva a cabo una sesión grupal para la selección de los atributos y generar un consenso en la definición de los atributos sensoriales para que cada uno posea su propia lista de términos comparándola con la grupal (**Dairou & Sieffermann, 2002; Severiano-Pérez et al., 2019**). Una vez recopilados los resultados del perfil de los productos evaluados se realiza un Análisis de Procrustes Generalizado para el análisis estadístico de los datos siendo multivariado (**Rodríguez, 2022**). De esta manera, el FP, derivado del QDA[®], incluye un listado de todos los atributos sensoriales percibidos, el orden en el que estos atributos son percibidos, la medida de intensidad relativa para cada atributo (con múltiples repeticiones), y el posterior análisis estadístico de las respuestas (**Stone & Sidel, 2004**).

Así, algunas de las ventajas de esta técnica es el tiempo reducido de aplicación y obtención de resultados, su alta rentabilidad a comparación de otros métodos de análisis descriptivo (**Dairou & Sieffermann, 2002; Severiano-Pérez *et al.*, 2019**). También, esta metodología no requiere de jueces forzosamente, aunque sí se pueden utilizar y facilita la evaluación (en cuanto a identificación de percepciones y terminología, reduciendo el tiempo de evaluación), donde se ha visto que un panel de jueces entrenados puede ser constituido por 6–12 personas, mientras que con un panel de consumidores se necesitan entre 20–40 personas para su validez estadística (**Varela & Ares, 2012: citados por Ayala, 2016**).

2.8. Análisis de Procrustes Generalizado

El Análisis de Procrustes Generalizado (GPA por sus siglas en inglés) es un método de análisis estadístico multivariado con amplia aplicación y de uso recurrente en el análisis de la ES. Su importancia radica en una serie de transformaciones realizadas a un conjunto de datos, de tal manera que se reduce la influencia (cierto sesgo) del evaluador para llegar a un consenso global y mostrar, de manera gráfica, qué atributos sensoriales están más relacionados con las muestras analizadas.

Tratándose de un método de análisis de datos derivados de varios individuos (jueces o panel), el objetivo principal de esta metodología es observar cómo difiere la percepción que tiene cada individuo de una observación (estímulo, muestra o tratamiento) dada (**Carmona, 2013; Ayala, 2016**). A partir de las transformaciones matemáticas realizadas (traslación, rotación y reflexión, y escalamiento; **Figura 17**) para cada evaluador, se analiza la proximidad de las evaluaciones de los evaluadores a partir de sus propias escalas para poder describir un producto. De esta forma, a diferencia del Análisis de Componentes Principales (PCA) donde se utilizan las medias de los parámetros a analizar, el GPA utiliza cada puntaje individual para tomar en consideración cualquier variación (**Pastor et al., 1996; Meullenet et al., 2007; Giménez et al., 2015; Ayala, 2016, García, 2016; Johnson, 2021**). Se consigue que los objetos estén lo más cerca posible entre sí, reduciendo la influencia del panelista, mediante ajustes de escala y nivel, rotando y/o reflejando las distintas configuraciones. Un punto importante por notar es que, a lo largo de estas transformaciones, las distancias entre los “N” objetos evaluados para un juez no cambian, es decir, a pesar de la contracción (escalamiento) de las configuraciones las distancias relativas entre los objetos de un mismo evaluador no cambiarán. Siendo el caso que dichas distancias implican la relación existente entre cada una. Así, cuanto más cercanos estén los objetos unos de otros, mayor similitud y, cuanto más alejados se encuentren entre sí, mayores serán las diferencias entre estos. Es a partir de esto que se podrá generar un consenso (**Dijksterhuis, 1996; Lawless & Heymann, 2010; Ayala, 2016**).

Así, en las transformaciones realizadas a los datos (**Figura 17**): en la traslación de los datos se minimiza el efecto de los jueces cuando usan de forma diferente la escala; en la rotación y reflexión, se corrige el efecto debido a la diferencia del vocabulario por parte de los panelistas; finalmente, en el escalamiento se basa en que la percepción de un panelista a otro no difiere, solamente se asignan valores distintos y se requiere de esta transformación por el diferente uso de la escala (**Pastor *et al.*, 1996; Ayala, 2016**).

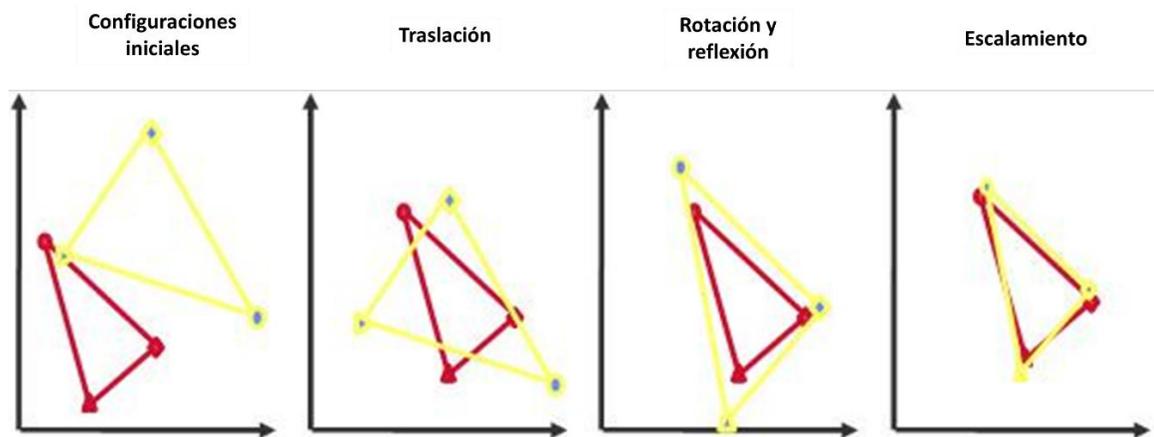


Figura 17. Transformaciones realizadas al conjunto de datos mediante el GPA.

Fuente: Adaptado de **Johnson (2021)**.

De esta forma, el GPA se encarga del procesamiento de los datos originales mediante una serie de transformaciones de las matrices de datos de cada panelista, reduciendo considerablemente las diferencias presentadas por los efectos de interpretación, magnitud y de escala, conservando las proporciones entre los conjuntos de datos para cada juez y, como se ha mencionado anteriormente, llevando a la formación de un consenso espacial de todos los datos (**Dijksterhuis, 1996; Lawless & Heymann, 2010; Ayala, 2016**).

Finalmente, al contar con la matriz consenso de todos los panelistas (promedios grupales espaciales de todo el panel por muestra), a todo el conjunto de datos se le realiza un PCA, para obtener así los porcentajes de los distintos componentes que explican la variabilidad de las observaciones (muestras o tratamientos) (**Dijksterhuis, 1996; Ayala, 2016**).

2.9. Análisis Factorial Múltiple

El Análisis Factorial Múltiple (MFA por sus siglas en inglés), creado por **Escofier & Pagès (1984)**, se trata de un análisis estadístico que es una combinación del PCA (para datos cuantitativos), Análisis de Correspondencias Múltiples (MCA por sus siglas en inglés, para datos cualitativos) y el Análisis de Correspondencia (CA por sus siglas en inglés, para datos de frecuencia), con gran aplicación en la ES. En el MFA se estudian las relaciones entre distintos conjuntos de variables (agrupados en tablas de datos) aplicados a las mismas observaciones (tratamientos o muestras), siendo analizados simultáneamente, para así obtener gráficos que ayudan a visualizar las relaciones entre las observaciones, las variables y las distintas tablas de datos. También, este método provee a su vez de puntajes de factores comunes para la identificación de similitudes o diferencias entre observaciones. Una de las principales características de este análisis es que se pueden aplicar a tablas de distintos tipos, ya sean cuantitativas, cualitativas o de frecuencia (**XLSTAT, s.f.; Pagès, 2004; Abdi et al., 2013**).

De acuerdo con la metodología presentada por (**XLSTAT, s.f.; Pagès, 2004**) para el MFA, primero se realizan individualmente para cada tabla un PCA, MCA o CA de acuerdo con el tipo de variables de la tabla, donde se guarda el valor propio de cada análisis. Posteriormente se lleva a cabo un PCA ponderado en las columnas de las tablas, transformando las tablas de variables cualitativas en tablas disyuntivas. De esta manera, la ponderación de las tablas se realiza para evitar que aquellas tablas con mayor cantidad de variables pesen demasiado en el análisis. Así, una de las ventajas de este análisis estadístico es que permite visualizar las tablas, las variables, los ejes principales del análisis, y las muestras en espacios bi- y tridimensionales, de tal manera que se pueda explicar el impacto de ciertas tablas en las observaciones gracias a que se encuentran ahora descritas por todas las variables, pudiéndose comparar con las observaciones proyectadas descritas por una sola tabla.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo General

Caracterizar fisicoquímica, física y sensorialmente diferentes variedades de tunas (*Opuntia* spp.) provenientes del Valle de Teotihuacán (Estado de México) y del Altiplano Mexicano (San Luis Potosí y Tamaulipas), para conocer su composición y atributos sensoriales que las caracterizan.

3.2. Objetivos Particulares

- Evaluar las características fisicoquímicas y físicas de cada variedad de tuna.
- Por medio de un texturómetro y un colorímetro, conocer las características de textura y color instrumentales, respectivamente, de las tunas.
- Desarrollar el perfil sensorial de las distintas variedades de tuna.
- Correlacionar los atributos sensoriales de la tuna con los parámetros de textura y color, así como con sus características físicas y fisicoquímicas para conocer qué parámetros están correlacionados con cada variedad.

4. HIPÓTESIS

El perfil sensorial de las tunas permitirá demostrar el efecto de la región de origen en sus características sensoriales por lo que, con ello, las muestras del Altiplano Mexicano serán menos ricas en color, aroma y sabor que las del Valle de Teotihuacán.

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. Materiales

En este estudio se utilizaron diferentes muestras de tunas (*Opuntia* spp.) de distintas localidades de San Luis Potosí (SLP), así como del Estado de México (Edomex) y Tamaulipas (Tamps.), donde las variedades evaluadas en este estudio se muestran en la **Tabla 5**. Todas las muestras fueron proporcionadas por el Dr. Oswaldo Pérez, quien estuvo visitando productores de tuna en las distintas localidades y estados productores de tuna en México, principalmente en el norte del país.

Tabla 5. Datos de origen de muestras de tuna (*Opuntia* spp.) analizadas del Altiplano Mexicano y del Valle de Teotihuacán, así como diferenciación general por color de pulpa y cáscara.

Muestra	Estado	Localidad	Variedad	Especie**	Color Cáscara*	Color Pulpa*
TE1	Edomex	San Martín de las Pirámides	Reyna	<i>O. albicarpa</i> Sheinvar/ <i>O. amyclaea</i>	V	V-B
TS1	SLP	Mexquitic de Carmona	Cristalina	<i>O. albicarpa</i> Sheinvar	V	B-V
TS2	SLP	Mexquitic de Carmona	Amarilla Montesa	<i>O. megacantha</i>	N-V	N
TS3	SLP	Mexquitic de Carmona	Amarilla Venado	<i>O. megacantha</i>	V-A	V-A
TE3	Edomex	Santiago Tolman, Otumba	Pico Chulo	<i>O. megacantha</i>	V-N	RS-RJ
TS4	SLP	Mexquitic de Carmona	Cardona	<i>O. streptacantha</i>	RJ-M	RJ-M
TE2	Edomex	San Martín de las Pirámides	Reyna	<i>O. albicarpa</i> Sheinvar	V	V-B
TE4	Edomex	San Martín de las Pirámides	Roja San Martín	<i>O. megacantha</i> / <i>O. ficus-indica</i>	RJ	RJ-RS
TT1	Tamps.	Miquihuana	Amarilla Miquihuana	<i>O. lasiacantha</i>	N	N-A
TE5	Edomex	Santiago Tolman, Otumba	Amarillo Plátano	<i>O. megacantha</i>	A-V	A-N
TS5	SLP	El Valle de Palomas, Soledad de Graciano Sánchez	Roja Pelona	<i>O. ficus-indica</i> L.	RJ-V	RJ-M
TS6	SLP	San Antonio de Eguía, Armadillo de los Infante	"Naranjona"	<i>O. megacantha</i>	N-V	N
TS7	SLP	Villa de Arriaga	Charola	<i>O. streptacantha</i>	RJ	RJ-RS

* Por observación empírica de las muestras evaluadas, A: amarillo, B: blanco, M: morado, N: naranja, RJ: rojo, RS: rosa, V: verde.

** Fuente: Gallegos *et al.* (2006) & Samah *et al.* (2016).

Algo importante a notar es que las tunas TE1 (Reyna 1) y TE2 (Reyna 2) son la misma variedad (Reyna) y del mismo cultivar, pero con condiciones de maduración distintas, tratándose la Reyna 1 de un fruto más joven y con un perfil más suave en sabor que la Reyna 2, un fruto más maduro e intenso en sabor. Asimismo, la sequía de este año (PPMA muy baja), ocasionó que muchas de las variedades analizadas fueran más pequeñas y con una menor producción.

En la **Tabla 6** se muestra el nombre de los jueces entrenados (en la evaluación de frutas e identificación de olores) que participaron en el estudio.

Tabla 6. Lista de jueces entrenados que participaron como evaluadores para la metodología del perfil flash de tunas (*Opuntia* spp.) del Altiplano Mexicano y del Valle de Teotihuacán.

NOMBRE DE JUEZ ENTRENADO
Gaenza Ruiz Samantha Stephanie
García Cerón Wendolyne
García Moreno Diana Yunuen
García Reyes Mariana Michell
Ortiz Frayre Andrea
Oseguera Sánchez Víctor Javier
Rodríguez Méndez Daniela
Roldán Miranda Edgar Jesús
Rubí Delgado Edith Guadalupe
Sánchez Ramírez Yasmín
Téllez Cruz Lizbeth
Viveros Gutiérrez Andrea Abigail
Aguilera Ocaña Vivián

* Todos los jueces firmaron una carta de consentimiento informado para participar en el estudio y para que sus nombres pudieran ser publicados.

5.2. Diagrama general

Los pasos que se siguieron para el desarrollo de la metodología se muestran en la **Figura 18**. Al recibir las muestras, se procedió con el conteo y organización/ distribución de frutos disponibles para contar con suficientes muestras para la evaluación sensorial, los análisis químicos, fisicoquímicos, y físicos. Se realizó en cada muestra la limpieza y desinfección de los frutos para la generación del perfil sensorial. Simultáneamente se procedió a las evaluaciones físicas, e instrumentales de textura y color.

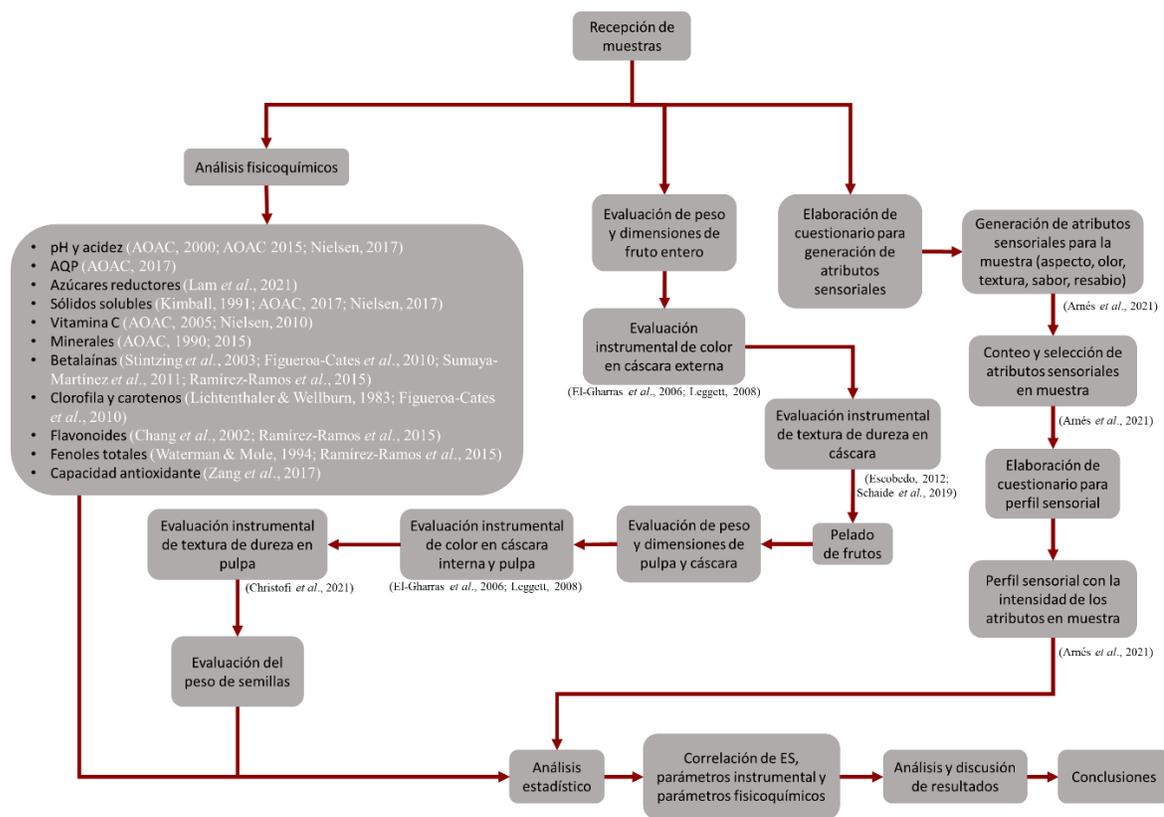


Figura 18. Diagrama general de estrategia experimental.

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se describe el desarrollo de la metodología. Es importante mencionar que para los análisis químicos y fisicoquímicos (excepto sólidos solubles) realizados se emplearon al menos 30 frutos de cada variedad, donde estos últimos se evaluaron en el Laboratorio de Bromatología del Departamento de Nutrición Animal y Bioquímica de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la UNAM.

5.3. Análisis físicos

Se realizó la evaluación física de las tunas, empezando por las dimensiones del fruto completo utilizando un Calibrador Vernier analógico (Scala, MetroMex) con una sensibilidad de 0.001 cm, y su pesado con una balanza analítica (Adventure Pro AV812, OHAUS) con una sensibilidad de 0.001 g. Tras el pelado, se midió el grosor de la cáscara con el Vernier analógico y su peso en balanza analítica. Por otra parte, también se midieron las dimensiones de la pulpa entera y su peso con los mismos procedimientos mencionados. Las dimensiones consideradas en este estudio, tanto para la tuna completa (**Figura 19**) como para la pulpa (**Figura 20**) de las distintas variedades de tuna, fueron el eje polar y dos ejes ecuatoriales, uno mayor (EEMa) y otro menor (EEme). Los resultados de peso se reportaron en g, mientras que los resultados de dimensiones se reportaron en cm. Todas estas determinaciones se realizaron en 10 muestras para obtener un promedio, por cada variedad de tuna.

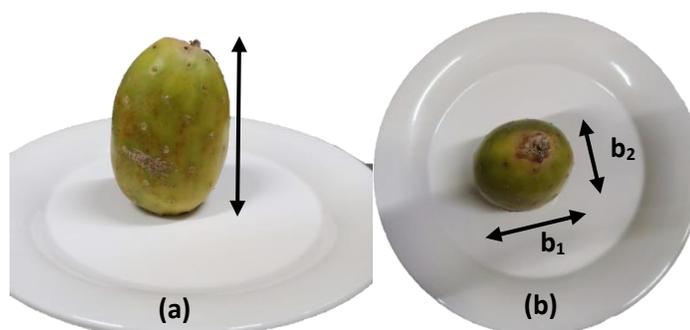


Figura 19. Dimensiones medidas en fruto completo: (a) eje polar, y (b) eje ecuatorial mayor (b_1) y eje ecuatorial menor (b_2), de tuna (*Opuntia* spp.) del Altiplano Mexicano y del Valle de Teotihuacán.
Autor: Diego Juárez.

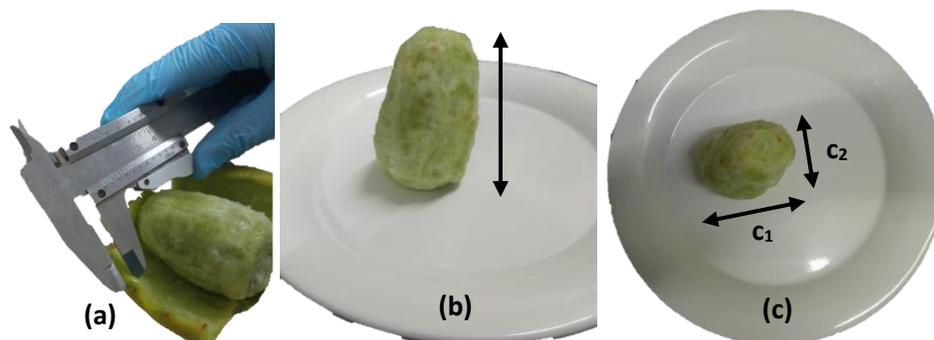


Figura 20. Dimensiones medidas en cáscara y pulpa: (a) grosor de cáscara, (b) eje polar, y (c) eje ecuatorial mayor (c_1) y eje ecuatorial menor (c_2), de tuna (*Opuntia* spp.) del Altiplano Mexicano y del Valle de Teotihuacán.
Autor: Diego Juárez.

Para la cuantificación en peso de las semillas de tuna (**Figura 21**), después de las mediciones de dimensiones y peso, se procedió al licuado de las pulpas enteras de tuna junto con agua para facilitar este proceso, haciéndolo en ráfagas cortas para evitar provocarle daño a las semillas. Después de al menos 10 ráfagas de licuado, se procedió al colado de semillas y cepillado en húmedo para retirar el exceso de pulpa adherido o libre junto a las semillas. Posteriormente, se distribuyeron las semillas en platos de plástico para el secado de las semillas, retirando a su vez exceso de pulpa remanente con estas, así como exceso de agua. Al menos 4 días de secado después, se procedió a un cepillado en seco de las semillas para retirar el mucílago deshidratado aún adherido a las semillas, para así poder cuantificar el contenido de semillas. Finalmente se pesaron las semillas secas y cepilladas con una balanza analítica (Adventure Pro AV812, OHAUS) sobre canastillas de papel previamente tarado.

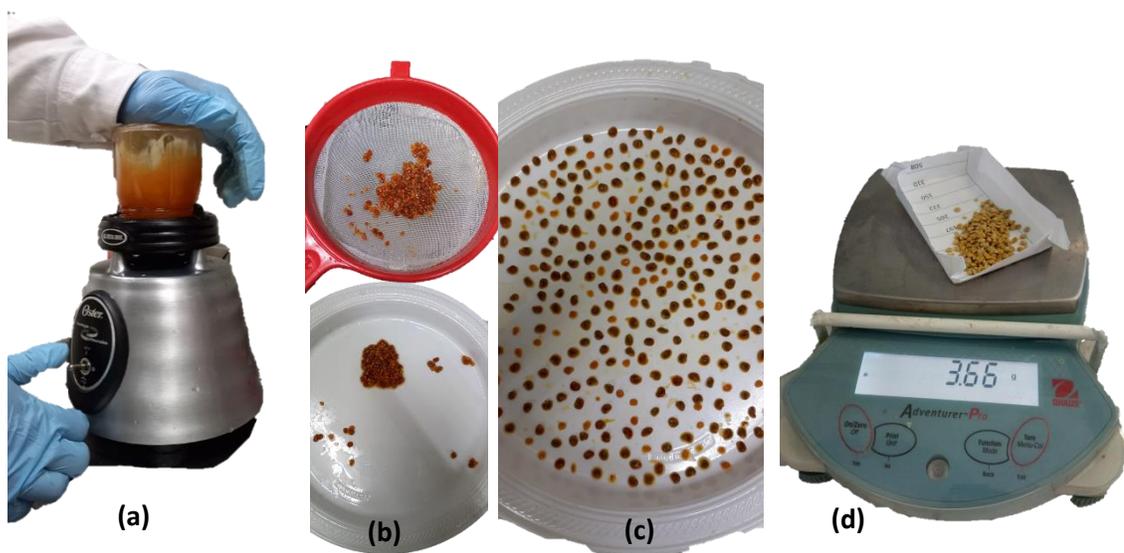


Figura 21. Proceso de determinación de semillas en peso de tunas (*Opuntia* spp.) del Altiplano Mexicano y del Valle de Teotihuacán: (a) licuado, (b) colado, (c) distribución, y (d) pesado.

Autor: Alejandro Oros & Karla Nava.

5.4. Colorimetría

Se realizó la evaluación instrumental del color de los frutos como es mencionado por **El-Gharras *et al.* (2006)** y **Leggett (2008)**. Primero se midió el color de la cáscara externa (**Figura 22a**) del fruto en 6 puntos diferentes haciendo uso de un colorímetro portátil (CS-410 Spectral Colorimeter Spectrophotometer, CHNSpec Technology). Tras el pelado, se midió el color de la cara interna de la cáscara (**Figura 22b**) en 6 puntos distintos. Finalmente, también se midió el color en 6 partes distintas (2 en el centro y 4 en los extremos) de la pulpa (**Figura 22c**). Las mediciones se realizaron en el espacio de color CIELab, obteniendo datos de L^* , a^* y b^* . Mediante el uso de las **Ecuaciones 1, 2 y 3**, presentadas por **McLellan *et al.* (1995)** y **Beetsma (2020)**, se calcularon los parámetros de color corregidos de acuerdo con su posición en las coordenadas a^* y b^* : Chroma o saturación (C^*), y hue o tono o matiz (h) [$^\circ$, grados].

$$C^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2}$$

Ecuación 1. Parámetro Chroma (C^*) del color.
Fuente: **Beetsma (2020)**.

$$h = \tan^{-1}\left(\frac{b^*}{a^*}\right)$$

Ecuación 2. Parámetro hue o matiz (h) del color, en el cuadrante I del plano a-b.
Fuente: **McLellan *et al.* (1995)**.

$$h = 180^\circ + \tan^{-1}\left(\frac{b^*}{a^*}\right)$$

Ecuación 3. Parámetro hue o matiz (h) del color, en los cuadrantes II y III del plano a-b.
Fuente: **McLellan *et al.* (1995)**.

Asimismo, se calculó el ΔE^*_{ab} (**Ecuación 4**) en todas las partes evaluadas de las tunas, entre todas, mediante la para conocer qué muestras presentaron diferencias en sus colores.

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2}$$

Ecuación 4. Diferencia entre dos colores (ΔE_{ab}^*) en el espacio de color del sistema CIEL*a*b*.

Fuente: Beetsma (2020).

Donde:

- ΔE_{ab}^* : Diferencia generalizada entre dos colores en el espacio CIEL*a*b*.
- ΔL^* : Diferencia en la luminosidad del color (L^*) en el sistema CIEL*a*b*.
- Δa^* : Diferencia en el parámetro a^* del color en el sistema CIEL*a*b*.
- Δb^* : Diferencia en el parámetro b^* del color en el sistema CIEL*a*b*.

Todas estas determinaciones se realizaron por sextuplicado, por lo que se hicieron 36 mediciones (para obtener un promedio) para cada parte anteriormente mencionada, por cada variedad/muestra de tuna.

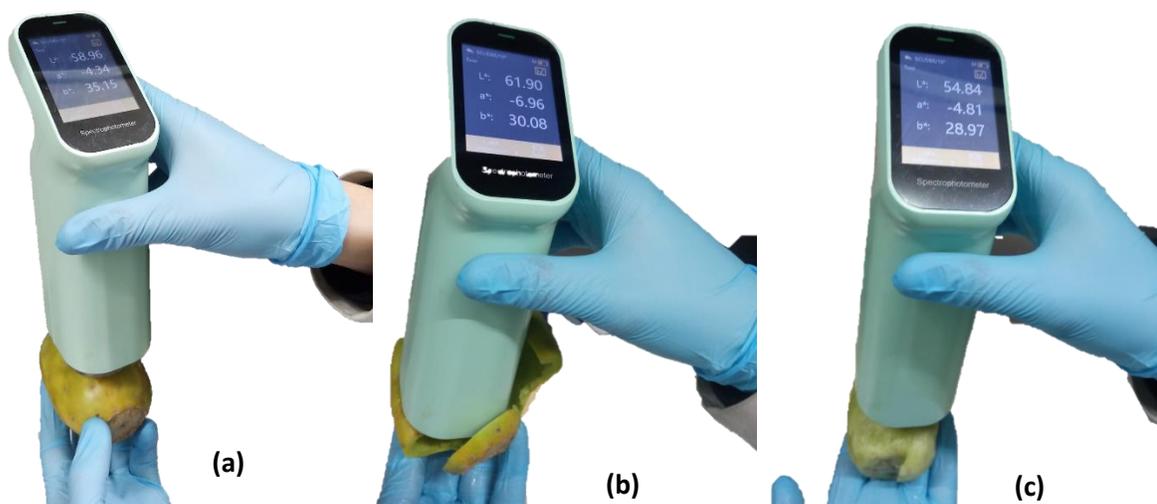


Figura 22. Evaluación de color instrumental de tuna (*Opuntia* spp.) del Altiplano Mexicano y del Valle de Teotihuacán, en (a) cáscara externa, (b) cáscara interna, y (c) pulpa.

Autores: Alejandro Oros & Diego Juárez.

5.5. Evaluación instrumental de textura

El análisis de textura de los frutos se realizó de acuerdo con lo mencionado por **Escobedo (2012)**, **Schaide et al. (2019)** y **Christofi et al. (2020)**, utilizando un texturómetro TA.XT2 plus (Stable Micro Systems) equipado con una célula de carga de 30 kg. Se realizaron dos pruebas: primero con una sonda de aguja de 2 mm de diámetro (P/2N), con una velocidad de preensayo y ensayo de $0.5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ y la profundidad de penetración a 6 mm; seguida de la segunda con una celda Kramer con 5 cuchillas, a una velocidad de preensayo y ensayo de $1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ a una profundidad de 40 mm. La primera prueba fue para un análisis de punción de la cáscara para evaluar dureza, y la segunda prueba fue para un análisis de dureza en la pulpa, con el registro de los datos con el software Exponent (Stable Micro Systems Ltd., TA.XT2, Surrey, U.K.).

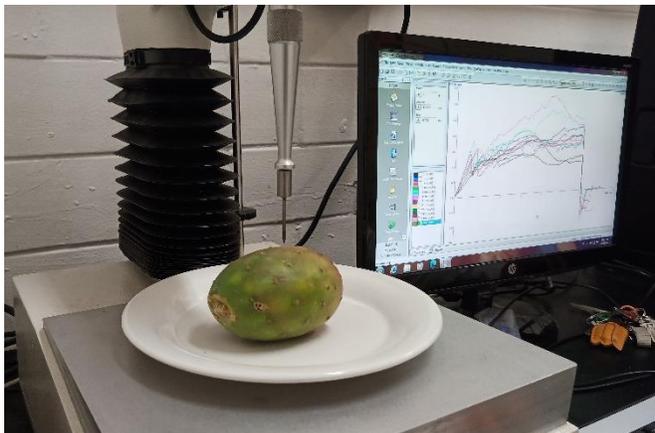


Figura 23. Acomodo de sonda para punción y tuna (*Opuntia* spp.) del Altiplano Mexicano y del Valle de Teotihuacán para evaluación instrumental de textura en pulpa.
Autor: Alejandro Oros.

Para el análisis de punción para dureza de la cáscara (**Figura 23**), se utilizaron los frutos completos sin pelar realizando 3 punciones por fruto en tres partes: inferior, centro y superior.

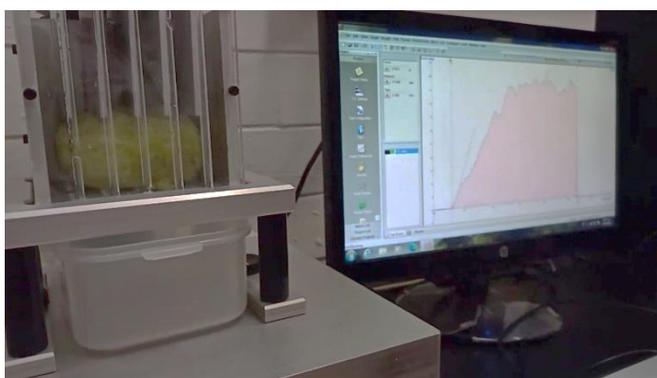


Figura 24. Acomodo de celda Kramer con cuchillas (5) y tuna (*Opuntia* spp.) del Altiplano Mexicano y del Valle de Teotihuacán para evaluación instrumental de textura en pulpa.
Autor: Alejandro Oros.

Por otro lado, para el análisis de dureza de la pulpa (**Figura 24**) se retiró la cáscara de los mismos frutos utilizados en la prueba anterior. También, se colocó el fruto dentro de la celda de Kramer de manera que al menos tres de las cuchillas de la sonda (de cinco cuchillas) cortan el fruto en tres puntos distintos: el

centro, parte superior y parte inferior. Se utilizaron los datos obtenidos de dureza (en cáscara), y de fuerza de corte máxima en pulpa para caracterizar las propiedades de textura de las variedades de tuna. Los resultados se expresaron como fuerza en Newtons (N). Las determinaciones de dureza en cáscara se realizaron en 6 frutos, con un total de 18 mediciones por variedad de tuna; mientras que las determinaciones de dureza en pulpa se realizaron en 5 frutos, para obtener un promedio, por cada variedad/muestra de tuna.

La aplicación de la prueba de punción es realizada en un solo punto, por lo que es más adecuada para la evaluación de textura en cáscara. Por otro lado, la KST da una mejor información de la textura para la pulpa porque, al ser varias cuchillas (3 o más) las que cortan directamente la pulpa, se cuenta con una mayor superficie de contacto.

5.6. Determinación de pH y acidez titulable

Para la determinación de pH, se siguió el método 981.12 de la **AOAC (2015)**, y con lo mencionado por **Nielsen (2017)**. Se analizó este parámetro en la parte comestible de los frutos. Con 10 g de muestra de pulpa (sin semilla), se agregaron 30 mL de agua destilada y se licuó. Posteriormente se coló la disolución y aforó a 50 mL con agua destilada. Finalmente se midió el pH con un potenciómetro previamente calibrado con dos soluciones amortiguadoras de pH 4 y 7 para tener mayor precisión. Los valores fueron reportados con dos decimales. Asimismo, esta determinación se realizó por triplicado por cada variedad/muestra de tuna.

Por otro lado, la determinación de acidez titulable, se siguió el método 942.15 de la **AOAC (2000)** con ligeras modificaciones. Se analizó este parámetro en la parte comestible de los frutos. Con 10 g de muestra de pulpa (sin semilla), se agregaron 30 mL de agua destilada y se licuó. Posteriormente se coló la disolución y aforó a 50 mL con agua destilada. Al tratarse de soluciones muy coloridas, estas se diluyeron 2:20 en agua destilada, y se tituló con una disolución estandarizada de hidróxido de sodio (NaOH) 0.1 M, adicionando 0.3 mL

(aproximadamente 6 gotas) de una solución preparada del indicador: fenolftaleína. Se tituló hasta la persistencia de una coloración rosada tenue ≥ 30 s. La acidez titulable se expresó como g de ácido cítrico en 100 g de pulpa fresca (g ác. cít./100 g o % ác. cít.), y esta determinación se realizó por triplicado para obtener un promedio, por cada variedad/muestra de tuna.

5.7. Análisis Químico Proximal

El Análisis Químico Proximal (AQP por sus siglas) se realizó de acuerdo con los métodos de la **AOAC (2017)** en pulpa fresca de tuna:

- La determinación de humedad en la muestra se realizó con el método 934.01.
- El contenido de materia seca (MS) en la muestra se llevó a cabo mediante el uso de la **Ecuación 5**.

$$\% MS = 100 - \% H$$

Ecuación 5. Contenido de materia seca (% MS) en muestra (base húmeda).

Donde:

% MS: Porcentaje de materia seca en la muestra (base húmeda).
% H: Porcentaje de humedad en la muestra (base húmeda).

- La determinación de proteína cruda se llevó a cabo de acuerdo con el método 2001.11, de Kjeldahl, utilizando un factor de 6.25 para el nitrógeno.
- En cuanto a la determinación de cenizas, esta se realizó con el método 942.05.
- La determinación de fibra cruda se llevó a cabo de acuerdo con el método 962.09.
- Para el extracto etéreo (lípidos crudos), este se determinó mediante el método 920.39.
- Finalmente, la determinación del Extracto Libre de Nitrógeno (ELN) se realizó con la **Ecuación 6**, de acuerdo con el método 986.25 de la **AOAC (2000)**.

$$\% \text{ELN} = 100 - (\% \text{H} + \% \text{PC} + \% \text{EE} + \% \text{FC} + \% \text{C})$$

Ecuación 6. Contenido del ELN en muestra (base húmeda).

Donde:

% ELN:	Porcentaje del extracto libre de nitrógeno en la muestra (base húmeda).
% H:	Porcentaje de humedad en la muestra (base húmeda).
% PC:	Porcentaje de proteína cruda en la muestra (base húmeda).
% EE:	Porcentaje de extracto etéreo en la muestra (base húmeda).
% FC:	Porcentaje de fibra cruda en la muestra (base húmeda).
% C:	Porcentaje de cenizas en la muestra (base húmeda).

Los porcentajes de cada uno de los componentes alimentarios cuantificados se expresaron como g del componente en 100 g de pulpa fresca, o como porcentaje del componente en la pulpa fresca (g/100 g ó % componente), y todas estas determinaciones se realizaron por duplicado para cada variedad de tuna.

5.8. Cuantificación de azúcares reductores

La cuantificación de azúcares reductores se realizó de acuerdo con el método de DNS (ácido 3,5-dinitrosalicílico), mencionado por **Lam et al. (2021)**, con una modificación. La tuna fue pelada y la pulpa (1 g) fue molida, para posteriormente ser licuada con carbón activado y 100 mL de agua destilada, para la clarificación (eliminación de pigmentos) del jugo. Luego, se centrifugó la solución a 5 000 rpm durante 15 min. Así, se tomó 1.0 mL del sobrenadante y se extrajeron los azúcares con etanol (etanol/agua 1:1 v/v) a temperatura ambiente con una relación sobrenadante:solución de 1:2 (m/v). Tras el filtrado, se obtuvieron por evaporación los gránulos de azúcares.

Posteriormente, 0.25 g del azúcar proveniente de la muestra se disolvieron en agua destilada cuanto baste para (c.b.p.) 25.0 mL, tomando 2.0 mL de esta disolución y diluyendo a

10.0 mL con agua destilada. Después del filtrado, 2.0 mL de la disolución diluida se mezclaron con 1.5 mL de una solución de DNS (1.00 g de DNS en 20.0 mL de NaOH 2.0 N y 50.0 mL de agua destilada, 30.0 g de tartrato de sodio y potasio fueron calentados usando un baño María hasta completa solubilización, y posteriormente aforado a 100.0 mL con agua destilada) y 6.5 mL de agua destilada durante 1 min, para después calentarlo a 80 °C utilizando un baño María durante 10 min y enfriado con agua por 20 min. La solución resultante fue medida a una longitud de onda de 510 nm por espectrofotometría UV-Vis (**Lam et al., 2021**). El blanco de muestra fue preparado con el mismo procedimiento con glucosa. La cantidad de azúcares reductores se expresaron como g de azúcares reductores en 100 g de pulpa fresca (g azúc. red./100 g), y para cada variedad/muestra de tuna se realizaron determinaciones por triplicado.

5.9. Determinación de sólidos solubles

La determinación de sólidos solubles (**Figura 25**) se realizó mediante el método refractométrico, de acuerdo con lo mencionado por **Kimball (1991)**, el método 932.12/ 932.14A de la **AOAC (2017)** y **Nielsen (2017)**, comenzando con la extracción de jugo directo proveniente de la pulpa de la tuna y medición de sólidos solubles (expresado como °Brix) con un refractómetro digital portátil [ATAGO® PAL-BX/RI (SUS)]. Esta determinación se realizó en 10 muestras para obtener un promedio, por cada variedad de tuna.



Figura 25. Evaluación de sólidos solubles en jugo de tuna (*Opuntia* spp.) del Altiplano Mexicano y del Valle de Teotihuacán.

Autor: Alejandro Oros.

5.10. Cuantificación de vitamina C

La determinación de vitamina C se realizó conforme a lo establecido en el método 967.21 de la AOAC (2005) y con lo mencionado por Nielsen (2010). Primero, se realizó la estandarización de la solución de indofenol (solución colorida). Se transfirieron 5 mL de una solución de ácido metafosfórico-ácido acético (en vaso de precipitados de 250 mL se agregaron 100 mL de agua destilada y luego 20 mL de ácido acético; posteriormente se agregaron y agitó hasta disolver 7.5 g de ácido metafosfórico; luego se agregó agua destilada c.b.p. 250 mL, y se filtró con papel filtro) en matraz Erlenmeyer de 50 mL. Posteriormente se agregaron 2.0 mL de la solución estandarizada de ácido ascórbico (en balanza analítica, pesar 50 mg de ácido ascórbico; una vez anotado el peso de ácido ascórbico, se transfirió a un matraz volumétrico de 50.0 mL, y se diluyó con agua destilada c.b.p. la marca de aforo) en cada matraz Erlenmeyer. Posteriormente se llenó una bureta de 25.0 mL con la solución de indofenol (en vaso de precipitados de 200 mL con 50 mL de agua destilada y desionizada se agregaron y agitó hasta disolver 42 mg de bicarbonato de sodio, luego se agregaron y agitó hasta disolver 50 mg de 2,6-diclorofenolindofenolato de sodio; una vez disueltos los sólidos, se diluyó la disolución con agua destilada y desionizada c.b.p. 200 mL; posteriormente se filtró con papel filtro y embudo). Luego, se comenzó a titular la solución estándar de ácido ascórbico con la solución de indofenol para estandarizarla, hasta que persista una coloración rosada tenue pero distintiva durante > 5 s (15 – 17 mL) con agitación constante, anotando la cantidad gastada de la solución de indofenol. Posteriormente se prepararon blancos: primero transfiriendo 7.0 mL de la solución de ácido metafosfórico-ácido acético en matraces Erlenmeyer de 50 mL, luego se agregó agua destilada aproximadamente igual al volumen gastado del colorante; y finalmente se titularon los blancos de la misma manera que la solución estándar de indofenol.

Una vez estandarizada la solución de indofenol, se procedió al análisis de las muestras de jugo de tuna (previamente filtrado de pulpa para evitar problemas durante la transferencia del jugo). Se transfirieron 5.0 mL de la solución de ácido metafosfórico-ácido acético y 2.0 mL del jugo de tuna filtrado en matraces Erlenmeyer de 50 mL. Posteriormente se tituló cada muestra con la solución estandarizada de indofenol hasta que persistiera > 5 s la coloración

rosada tenue. La cantidad de ácido ascórbico se expresó como mg equivalentes de ácido ascórbico en 100 g de pulpa fresca (mg EAA/100 g), y para todas estas determinaciones se realizaron 4 repeticiones, para cada variedad/muestra de tuna.

5.11. Cuantificación de minerales

La cuantificación de minerales de calcio (Ca), potasio (K), zinc (Z), fósforo (P), hierro (Fe), selenio (Se) y cobre (Cu) se realizó de acuerdo con el método 968.08 (Ca, Zn, Fe, Cu), 965.30 (K), 965.17 (P) y 969.06 (Se) de la **AOAC (1990; 2015)** mediante espectrometrías: de absorción atómica y por fotómetro de llama; mediante digestión e incineración de muestras de pulpa de tuna. Todos los resultados se expresaron como mg del mineral en 100 g de pulpa fresca (mg/100 g), excepto en la determinación de selenio, donde se reportó como μg de selenio en 100 g pulpa de pulpa fresca (mg Se/100 g). Realizando 4 repeticiones para obtener un promedio, por cada variedad/muestra de tuna.

5.12. Cuantificación de betalaínas

El contenido de betalaínas se realizó con el método propuesto por **Stintzing et al. (2003)** y de acuerdo con lo mencionado por **Sumaya-Martínez et al. (2011)** y **Ramírez-Ramos et al. (2015)**. Primero se pesó 1 g de muestra de pulpa de tuna congelada, a la cual se le agregaron 10 mL de agua destilada. Posteriormente esta muestra se sonicó por 20 min y luego se centrifugó a temperatura ambiente a 2200 g durante 20 min. Después se leyó la absorbancia de estos extractos con un espectrofotómetro a longitudes de onda de 483 nm y 538 nm para betaxantinas y betacianinas, respectivamente.

Adicionalmente, de acuerdo con lo mencionado por **Stintzing et al. (2001; 2005)** y **Figueroa-Cates et al. (2010)**, se realizó la medición espectrofotométrica de equivalentes de betanina (betacianina) e indicaxantina (betaxantina). Los extractos acuosos de pigmentos (se pelaron las muestras de tuna y el jugo obtenido de la pulpa por filtración con papel; luego se

filtraron hasta partículas de 0.45 μm previo a análisis) se diluyeron en una solución amortiguadora de pH 6.5 (citrato-fosfato) para obtener valores de absorción en un rango de 0.9 – 1.0 de la respectiva absorbancia máxima para cada pigmento. Así, se realizaron mediciones de absorbancia con un espectrofotómetro UV-visible a longitudes de onda de 538 nm y 480 nm para betanina e indicaxantina, respectivamente. Los resultados tanto de betacianinas y betaxantinas totales, así como de equivalentes de betanina e indicaxantina se expresaron como mg de pigmento por cada g de pulpa de tuna (mg EB/g y mg EI/g, respectivamente), y como mg de pigmento por litro de jugo de tuna (mg/L). Todas estas determinaciones se realizaron por triplicado para obtener un promedio, por cada variedad/muestra de tuna.

5.13. Cuantificación de clorofila y carotenos

La cuantificación de clorofila y carotenos se realizó con la metodología elaborada por **Lichtenthaler & Wellburn (1983)** y mencionada por **Figueroa-Cates *et al.* (2010)**. Para esto, a 10 mL de jugo de tuna se le agregaron 10 mL de acetona al 80 % para la extracción de pigmentos, posteriormente se filtró y se midió la absorbancia a tres longitudes de onda: 663, 646 y 476 nm (A_{663} , A_{646} y A_{476} , respectivamente), utilizando acetona al 80 % como blanco. Los resultados se expresaron como mg de pigmento por cada 100 g de pulpa (mg/100 g). Se utilizaron las ecuaciones presentadas por **Figueroa-Cates *et al.* (2010)** para el cálculo de clorofilas y carotenos, y con factores de dilución y conversión se obtuvieron los resultados como se menciona anteriormente. Estas determinaciones se realizaron por triplicado para obtener un promedio, por cada variedad/muestra de tuna.

5.14. Cuantificación de flavonoides

Para la determinación del contenido de flavonoides se siguió lo mencionado por **Chang *et al.* (2002)** y **Ramírez-Ramos *et al.* (2015)**. Se utilizó quercetina (flavonol: 3,3',4',5,7-pentahidroxi-flavona) como estándar para la curva de calibración. Para esta curva de calibración, se disolvieron 10 mg de quercetina en etanol (EtOH) al 80 %, para luego realizar diluciones de quercetina a 25, 50 y 100 $\mu\text{g/mL}$. Las disoluciones estándar (0.5 mL) fueron aforadas a 5.0 mL (por separado) con 1.5 mL de EtOH al 95 %, 0.1 mL de cloruro de aluminio

(AlCl_3) al 10 %, 0.1 mL de acetato de potasio (KAc) 1 M, y aproximadamente 2.8 mL de agua destilada para aforar. Después de una incubación a temperatura ambiente por 30 min se midió la absorbancia por espectrofotometría de cada disolución a una longitud de onda de 415 nm. Para el blanco, se sustituyó el volumen de cloruro de aluminio por la misma cantidad (0.1 mL) por agua destilada.

Una vez realizada la curva de calibración con el estándar de quercetina, se procedió a la medición espectrofotométrica en las muestras de tuna, obteniendo el jugo y filtrando para evitar interferencias por la pulpa; realizando el mismo procedimiento, utilizando 0.5 mL del extracto etanólico (80 %) del jugo de tuna filtrado (1 g de muestra se disolvió en 25.0 mL de EtOH al 95 % con agitación durante 15 min y tras reposo de al menos 24 h, el volumen fue ajustado a 25.0 mL con EtOH al 80 %) con 1.5 mL de EtOH al 95 %, 0.1 mL de AlCl_3 al 10%, 0.1 mL de KAc 1 M y aproximadamente 2.8 mL de agua destilada; midiendo la absorbancia a 415 nm e interpolando en la curva de calibración. Los resultados se expresaron como mg equivalentes de quercetina en 100 g pulpa fresca (mg EQ /100 g) (**Chang *et al.*, 2002**; **Ramírez-Ramos *et al.*, 2015**). Esta determinación se realizó por triplicado para obtener un promedio, por cada variedad/muestra de tuna.

5.15. Cuantificación de fenoles totales

La determinación de fenoles totales en tuna se realizó de acuerdo con lo mencionado por **Waterman & Mole (1994)** y **Ramírez-Ramos *et al.* (2015)**. Se utilizó ácido gálico como estándar para la curva de calibración. Para esta curva de calibración, se disolvieron 10 mg de ácido gálico en EtOH al 80 %, para luego realizar diluciones de ácido gálico a 25, 50 y 100 $\mu\text{g/mL}$. Las disoluciones estándar (0.5 mL) se les agregó (por separado) 10.0 mL de una solución de carbonato de sodio (Na_2CO_3) al 10 % e incubaron por 15 min a 38 °C. Después del reposo, se diluyó la solución (1.0 mL) en 3.0 mL de agua destilada y 1.0 mL del reactivo de Folín-Ciocalteu:agua destilada (1:1 v/v; sulfato de litio y ácido clorhídrico:agua destilada). Después de reposo en oscuridad por 15 min se midió la absorbancia por espectrofotometría de cada disolución a una longitud de onda de 660 nm. Para el blanco, se sustituyó el volumen

del reactivo de Folín-Ciocalteu:agua destilada (1:1 v/v) por la misma cantidad (1.0 mL) por agua destilada.

Una vez realizada la curva de calibración con el estándar de ácido gálico, a 0.5 mL del extracto etanólico (80 %) del jugo de tuna filtrado (1 g de muestra se disolvió en 25.0 mL de EtOH al 95 % con agitación durante 15 min y tras reposo de al menos 24 h, el volumen fue ajustado a 25.0 mL con EtOH al 80 %) se le adicionaron 10.0 mL de una solución de Na₂CO₃ al 10 % y se dejó en incubación por 15 min a 38 °C. Posteriormente se diluyó esta solución tomando 1.0 mL de esta con 3.0 mL de agua destilada y 1.0 mL del reactivo de Folín-Ciocalteu:agua destilada (1:1 v/v). Esta mezcla se dejó en reposo en oscuridad durante 15 min. Y finalmente se midió la absorbancia a 660 nm con un espectrofotómetro. El contenido de fenoles totales se expresó como mg equivalentes de ácido gálico en 100 g de pulpa fresca (mg EAG./100 g) (Waterman & Mole, 1994; Ramírez-Ramos *et al.*, 2015). Esta determinación se realizó por triplicado en las muestras para obtener un promedio, por cada variedad/muestra de tuna.

5.16. Determinación de la capacidad antioxidante

La determinación de la capacidad antioxidante en la tuna, medida como “Capacidad Antioxidante Equivalente de Vitamina C” (VCEAC por sus siglas en inglés), se realizó de acuerdo con lo mencionado por Zang *et al.* (2017), con medición espectrofotométrica UV-vis con 2,2-difenil-1-picrilhidracilo (DPPH) como iniciador de radicales. Para la elaboración de las curvas patrón o estándar, se preparó una solución estándar de ácido ascórbico de 0.3 mM disolviendo 5.28 mg de ácido ascórbico en agua destilada, y diluida a distintas concentraciones como soluciones patrón para la curva estándar. Así, para la medición de la curva patrón, se mezclaron 100 µL de cada solución patrón (0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.10 y 0.12 mg de ácido ascórbico/mL) con 3 mL de una solución de DPPH en MeOH. A esta solución analítica resultante fue medida la absorbancia con un espectrofotómetro UV-vis a 517 nm, dentro de una celda de cuarzo de 1 cm. Después, se calculó la inhibición de DPPH en la espectrometría UV-visible.

Primero, se homogeneizó cada muestra de pulpa y se procedió a su análisis inmediato, tomando 5 g del homogeneizado pesado dentro de un tubo para centrifuga de 50 mL. Posteriormente se añadieron 25 mL de una solución de EtOH/H₂O al 50 % para ser agitado con un mezclador de vórtice durante 1 min. Esta mezcla resultante se dejó en reposo a temperatura ambiente durante 30 min, para luego ser centrifugada por 5 min a 10 000 rpm. El sobrenadante de algunas de las variedades de tuna fue usado directamente como solución muestra y el tiempo de dilución fue de 1 min. Por otro lado, el sobrenadante de otras variedades de tuna se diluyó dos veces con EtOH al 50 %. Asimismo, para cada fruto se prepararon paralelamente y utilizaron en total 3 soluciones de muestra. Así, para la medición de las muestras se realizó de la misma manera que con las soluciones patrón, reemplazando los 100 µL de solución patrón por 100 µL de solución muestra, resultando en soluciones analíticas, a las cuales les fue medida la absorbancia, para cada una, con un espectrofotómetro UV-vis, igualmente a 517 nm, dentro de una celda de cuarzo de 1 cm (Zang *et al.*, 2017). De esta forma, la capacidad antioxidante se expresó como miligramos equivalentes de ácido ascórbico por cada 100 gramos de muestra (mg EAA/100 g). Asimismo, esta determinación se realizó por triplicado para obtener un promedio, por cada variedad/muestra de tuna.

5.17. Evaluación sensorial

Se utilizó el Perfil Flash modificado (mFP por sus siglas en inglés) (Väkeväinen *et al.*, 2020; Arnés *et al.*, 2021) para realizar el perfil sensorial de las tunas de las 12 variedades (13 muestras) evaluadas. Los panelistas fueron reclutados por el Laboratorio de Investigación de Evaluación Sensorial de la Facultad de Química de la UNAM. El FP fue generado por 13 jueces con un rango de edad de 21–25 años, 11 mujeres y 2 hombres, estudiantes de la Facultad



Figura 26. Evaluación sensorial de tuna (*Opuntia* spp.) en el Laboratorio de Evaluación Sensorial, Facultad de Química, UNAM. Autor: Alejandro Oros.

de Química, UNAM, entrenados en metodología descriptiva convencional durante aproximadamente 6 meses. Las muestras desinfectadas y recién peladas fueron presentadas de forma monódica en platos de color blanco, codificados con un código numérico de tres dígitos en forma aleatoria. Se proveyó de una galleta Habanera®, envuelta en servilleta, y agua para ser utilizadas como enjuague entre muestras. El mFP se condujo en la Facultad de Química, UNAM, en el Laboratorio de Evaluación Sensorial (**Figura 26**), equipado con cabinas individuales (**ISO, 2007**). Todos los cuestionarios de evaluación sensorial fueron diseñados con el software de FIZZ Acquisition (versión 2.51c, Acquisition & judge module, Biosystemes, Courtenay, Francia). Asimismo, todos los panelistas firmaron un consentimiento informado escrito (**Väkeväinen et al., 2020; Arnés et al., 2021**).



Figura 27. Evaluación del PF de tuna (*Opuntia* spp.) en el Laboratorio de Evaluación Sensorial, Facultad de Química, UNAM.

Autor: Alejandro Oros.

Para la generación del mFP, en la primera sesión los jueces describieron la muestra presentada en las cinco categorías generales de atributos no hedónicos (en el orden mencionado): apariencia, olor, textura, sabor y resabio. La segunda parte consistió en un consenso de los atributos más significativos presentes en las muestras para luego generar una forma de evaluación para cada variedad de tuna (**Anexo 6**), el consenso se realizó en una sesión. En la tercera parte los jueces evaluaron la intensidad de cada atributo (proveniente de la segunda parte) en cada muestra de tuna utilizando una escala estructurada de 10 puntos, en donde el 0 indicó la ausencia del atributo y 9 la máxima intensidad (**Anexo 7; Figura 27**) (**Arnés et al., 2021**), proveyendo a los panelistas las formas de evaluación de cada atributo presentado, para cada muestra de tuna.

5.18. Análisis estadístico

Para el análisis estadístico de las muestras se utilizó el software XLSTAT (Sensory, 2017.1.1, Addinsoft), realizando Análisis de Varianza (ANOVA, por sus siglas en inglés) con un nivel de significancia del 5 % ($\alpha = 0.05$). En caso de encontrar diferencia significativa, se llevó a cabo una comparación de medias de acuerdo con la prueba de Fisher (DMS, o bien, LSD por sus siglas en inglés). A cada variedad de tuna se le calculó media y desviación estándar de los parámetros analizados.

Para el análisis de los datos del FP se empleó el GPA, y para correlacionar las características sensoriales, instrumentales, físicas y fisicoquímicas de las muestras se realizó el MFA.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. Composición química, minerales y parámetros fisicoquímicos

6.1.1. Composición Química

Conocer la composición química de alimentos es de gran importancia particularmente para la nutrición y salud pública. Cuantificar estos componentes (con o sin su respectiva caracterización) es de gran ayuda para la elaboración de dietas y formulaciones de productos alimenticios para dietas saludables (**Elmadfa & Meyer, 2010**), así como para su calidad.

6.1.1.1. Humedad y materia seca

En el AQP de las variedades de tuna analizadas (**Tabla 7**) se encontró que las variedades con mayor contenido de humedad fueron la Roja San Martín, Amarilla Montesa, Amarilla Miquihuana y “Naranjona”, con valores de 82.31, 81.64, 81.44, y 81.21, respectivamente, no encontrándose diferencia significativa entre sí ($p > 0.05$). Asimismo, las variedades Reyna (1 y 2) y Cristalina presentaron un contenido de humedad similar entre sí ($\sim 79.85\% \text{ bh}$). Este resultado muestra que la humedad no se vio afectada por los cambios fisiológicos durante la maduración de la variedad Reyna. La variedad Charola fue la que presentó el contenido más bajo de humedad en su composición, siendo 0.96 veces menor a la variedad Roja San Martín, siendo esta última la variedad con más humedad con diferencia estadística con las otras muestras evaluadas. Con base en estos resultados, de manera general, las variedades de tuna roja presentaron baja humedad (a excepción de la Roja San Martín). Estos valores coinciden con lo reportado por **Medina et al. (2007)** para *O. ficus-indica*. Asimismo, los resultados obtenidos en el presente estudio presentaron valores, de manera general, ligeramente menores a lo reportado por **Aquino et al. (2012)** en variedades de tuna roja. Sin embargo, las variedades Amarilla Montesa, “Naranjona”, Roja San Martín y Amarilla Miquihuana fueron las variedades que presentaron una mayor similitud con lo reportado por los mismos autores. De igual manera, la humedad de las variedades analizadas en el presente estudio fue considerablemente menor a lo reportado por **Bariza et al. (2017)**. Por otro lado, el contenido de humedad que presentaron las variedades de tuna Cristalina y Reyna (1 y 2) en el presente estudio fue muy cercano a lo reportado por **Paucara (2017)** para una variedad de tuna blanca, así como

las variedades Cardona y Roja Pelona con lo reportado por el mismo autor en variedades de tuna rojas. Al contrario de esto, **Valero-Galván et al. (2021)** reportaron una humedad considerablemente más alta en variedades de tuna de distintas especies (*O. macrocentra*, *O. phaeacantha*, *O. engelmannii*, y *O. ficus-indica*), encontrándose entre 88.9 – 91.1%.

Aunado a este parámetro, la materia seca, de forma inversa, presentó valores elevados (en orden descendiente) en las variedades Charola, Cardona, Roja Pelona, Reyna (1 y 2), y Cristalina; mientras que la variedad Roja San Martín fue aquella con menor cantidad de materia seca. Asimismo, las variedades Roja Pelona, Amarilla Montesa, Pico Chulo, Cardona y Charola presentaron contenidos de materia seca mayores a lo reportado por **Zenteno-Ramírez et al. (2015)** en las respectivas variedades de tuna.

Así, el contenido de humedad en la tuna concuerda con el contenido de humedad en distintos tipos de frutas, como aguacate, mango, piña, entre otras, de acuerdo con lo publicado por **Gebhardt & Thomas (2002)**.

6.1.1.2. Proteína Cruda

Se determinó diferencia significativa ($p < 0.0001$) en el contenido de proteína cruda (base húmeda; **Tabla 7**) en las muestras de tuna, siendo la Roja San Martín la variedad con el mayor contenido de este componente con 1.16 %_{bh}, mientras que las variedades “Naranja” y Roja Pelona presentaron de manera significativa ($p < 0.0001$) el menor contenido de proteína cruda en su pulpa con 0.63 y 0.69 %_{bh}, respectivamente. Sin embargo, como se puede observar en la **Tabla 7**, la tuna Reyna 2 presentó un contenido de proteína cruda significativamente ($p < 0.05$) mayor a la Reyna 1, siendo que un fruto en su maduración de consumo presenta un contenido de proteína cruda mayor que un fruto menos maduro. Así, estos resultados coinciden con lo reportado por **Medina et al. (2007)** para *O. ficus-indica* (0.90 %), pero no para *O. dillenii* (0.52 %), teniendo casi el doble de proteína que esta última

(a excepción de las variedades “Naranjona” y Roja Pelona). De igual manera, los frutos analizados en el presente estudio presentaron un contenido de proteína cruda superior al reportado por **Aquino et al. (2012)** en variedades de tuna roja, donde las variedades “Naranjona” y Roja Pelona presentaron aproximadamente el triple, de manera general, a lo determinado por estos autores. Sin embargo, estos valores no coinciden con lo reportado por **Paucara (2017)**, donde las variedades Reyna presentaron un contenido menor, y la variedad Cristalina presentó un valor 0.929 veces menor al reportado por el mismo autor en variedades blancas.

Asimismo, con base en la composición en base seca de las variedades de tuna analizadas (**Anexo 1**), siendo esta una mejor forma para observar las diferencias en los componentes alimentarios dentro de dada matriz alimentaria seca (desprovista de humedad, o bien, agua libre), se observó que la variedad Roja San Martín fue aquella con significativamente ($p < 0.0001$) mayor contenido proteico en base seca con 6.57 %_{bs}, al igual que en base húmeda. Por otro lado, las tunas “Naranjona” y Roja Pelona fueron las variedades que presentaron un menor contenido proteico (base seca) en su matriz que el resto de las muestras evaluadas. Así, el contenido de proteína cruda (base seca) en estas variedades, en comparación con lo reportado por **Lamghari et al. (1998)** en frutos europeos (*O. ficus-indica* sp.: 5.13 %_{bs}), fue similar con respecto a las variedades Cristalina, Cardona y Amarilla Venado. Asimismo, **Valero-Galván et al. (2021)** reportaron un contenido de 1.5 y 1.7 % de proteína en pulpa de variedades de tuna roja y verde, respectivamente, de la especie *O. ficus-indica*, lo cual no coincide con lo determinado en el presente estudio, encontrándose más cercana (0.753 veces menor) la variedad Charola con lo determinado en tuna roja por el mismo autor.

Así, el contenido de proteína cruda en la tuna concuerda con el contenido de proteína en distintos tipos de frutas, como chabacano, nashi, aguacate, plátano, mora azul, zarzamora, carambola, toronja, kiwi, limón, entre muchas otras, de acuerdo con lo publicado por **Gebhardt & Thomas (2002)**.

6.1.1.3. Grasa Cruda

En cuanto al contenido de lípidos en la parte comestible (pulpa) en base húmeda (**Tabla 7**) de cada variedad de tuna, se encontró que la variedad con mayor contenido de grasa cruda, de manera significativa ($p < 0.001$), fue la Cristalina, seguida de la Amarillo Plátano. Por otro lado, las variedades que presentaron el menor contenido de lípidos crudos fueron provenientes del estado de SLP, siendo las variedades Roja Pelona y “Naranjona” con 0.21 y 0.27 %_{bh}, respectivamente. Así, el contenido de este componente alimentario en la pulpa de las distintas variedades de tuna, de manera general, se encontró entre 0.21 – 1.49 %_{bh}. Asimismo, se pudo observar que con un estado de maduración menor (Reyna 1) se tiene un contenido de grasa cruda significativamente ($p < 0.0001$) mayor que un fruto en estado de maduración de consumo (Reyna 2). De esta manera, los resultados del presente estudio presentaron valores, en su mayoría, superiores a lo reportado por **Medina et al. (2007)** para tunas de las especies *O. dillenii* y *O. ficus-indica*. En concordancia con estos datos, la variedad Roja San Martín presentó un contenido de grasa cruda similar al reportado por los mismos autores. Por otro lado, las variedades Roja Pelona y “Naranjona” presentaron un contenido de grasa cruda sustancialmente menor a lo reportado por los mismos autores. Asimismo, **Aquino et al. (2012)** realizaron determinaciones en tunas rojas de distintas variedades, reportando un contenido de grasa en su pulpa de entre 0.13 – 0.83 %_{bh}, mientras que algunas de las tunas evaluadas en el presente estudio presentaron un contenido similar o dentro del rango reportado por los mismos autores. Por otro lado, los resultados del presente estudio coinciden con **Paucara (2017)** en las variedades Roja Pelona y “Naranjona”, pero no en el resto de las muestras evaluadas.

Asimismo, se encontró que la variedad Roja Pelona presentó un contenido de lípidos (base seca; **Anexo 1**) cercano a lo reportado por **Lamghari et al. (1998)** en *O. ficus-indica* sp. También, **Valero-Galván et al. (2021)** reportaron un contenido de 0.1 – 0.4 % de lípidos en pulpa de variedades de tuna roja y verde de la especie *O. ficus-indica* y de otras especies de tuna, lo cual no coincide con lo determinado en el presente estudio en ninguna de las variedades analizadas, siendo al menos 1.683 veces mayores con respecto a lo determinado en tuna roja por los mismos autores.

Así, el contenido de grasa cruda en la tuna concuerda con el contenido de grasa en distintos tipos de frutas, como nashi, zarzamora, mora azul, cereza, mango, piña, entre muchas otras, de acuerdo con lo publicado por **Gebhardt & Thomas (2002)**.

6.1.1.4. Fibra Cruda

Con respecto al contenido de fibra cruda en pulpa (base húmeda; **Tabla 7**), se encontró que la variedad que presentó significativamente ($p < 0.0001$) el mayor valor de este componente alimentario fue la Roja Pelona (6.73 %_{bh}), pudiéndose notar que, de igual manera, variedades rojas de tuna presentaron un contenido elevado de fibra cruda, como son la Charola y Cardona. Por otro lado, variedades verde-blancas presentaron un contenido significativamente menor ($p < 0.0001$) al resto de las variedades de tuna. Asimismo, se pudo observar que la Reyna 2 presentó un contenido de fibra cruda significativamente mayor ($p < 0.05$), siendo 1.306 veces mayor que la Reyna 1, implicando que durante el desarrollo fisiológico hasta la maduración de consumo provoca un ligero incremento en este componente alimentario. Así, las variedades Cardona, “Naranjona”, Charola, Pico Chulo y Amarillo Plátano presentaron un contenido de fibra cruda similar al reportado por **Medina et al. (2007)** en *O. ficus-indica*, pero no para *O. dillenii*, dado que esta última fue de 9.49 % fibra total. Sin embargo, todas las variedades evaluadas en el presente estudio presentaron un contenido de fibra cruda notablemente mayor a lo reportado por **Aquino et al. (2012)** en todas sus variedades analizadas. Por otro lado, los resultados del presente estudio coinciden ligeramente con **Paucara (2017)** en la Reyna 2 para tunas blancas (3.63 %), así como las variedades Amarilla Montesa, Amarilla Venado, y ligeramente la Amarilla Miquihuana con lo reportado con el mismo autor para variedades naranja; pero no en el resto de las muestras evaluadas, las cuales presentan valores superiores de fibra a lo reportado por el mismo autor.

Se encontró que, para la fibra cruda en base seca (**Anexo 1**) en las distintas variedades de tuna, la tuna Roja Pelona fue aquella con mayor contenido, significativamente hablando ($p < 0.0001$), de este componente alimentario. Asimismo, **Lamghari et al. (1998)** reportaron

un contenido de fibra total en tuna (*O. ficus-indica* sp.) del 20.5 %_{bs}, lo cual coincide con lo encontrado para la tuna Amarilla Miquihuana. También, **Valero-Galván et al. (2021)** reportaron un contenido de 1.5 – 9.4 % de fibra cruda en pulpa de variedades de tuna roja y verde de la especie *O. ficus-indica*, así como tunas de la especie *O. macrocentra*, *O. phaeacantha* y *O. engelmannii*, lo cual no coincide con lo determinado en el presente estudio en ninguna de las variedades evaluadas.

Así, el contenido de fibra cruda en la tuna concuerda con el contenido de fibra en algunas frutas, como la manzana, nashi, aguacate, plátano, cereza, entre otras, de acuerdo con lo publicado por **Gebhardt & Thomas (2002)**.

6.1.1.5. Cenizas

Para el contenido de cenizas cuantificado en las distintas variedades de tuna (**Tabla 7**) se encontró que la variedad Cardona y Amarilla Venado presentaron el mayor contenido ($p < 0.0001$) del resto de las variedades analizadas. Por otro lado, la Reyna 1 fue la tuna que presentó de forma significativa ($p < 0.0001$) el menor contenido de cenizas, junto con las variedades Roja Pelona, Amarilla Montesa, y Pico Chulo. Asimismo, se encontró diferencia significativa entre las variedades Reyna (1 y 2), presentado la muestra con mayor madurez un contenido ligeramente mayor. También, como se puede observar en la **Tabla 6**, de manera general, las variedades provenientes del Altiplano Mexicano (0.42 %_{bh}) presentaron un contenido mayor de cenizas que variedades de tuna provenientes del Valle de Teotihuacán (0.36 %_{bh}). Por otro lado, las variedades Reyna (1 y 2) y Cristalina presentaron un contenido de cenizas menor al reportado por **Medina et al. (2007)** para tuna *O. ficus-indica* verde; presentando además estas variedades (blanco-verdes) un mayor contenido de cenizas. Sin embargo, las tunas Amarilla Montesa, Cristalina, Roja Pelona, Charola y Roja San Martín presentaron un contenido de cenizas similar al reportado por los mismos autores para tuna *O. ficus-indica* naranja. De la misma manera, las variedades Charola, Roja San Martín y Amarillo Plátano mostraron un contenido similar de cenizas al reportado por **Medina et al. (2007)** para tuna

O. dillenii. Sin embargo, la mayoría de las variedades evaluadas en el presente estudio presentaron un contenido de fibra cruda ligeramente menor a lo reportado por **Aquino et al. (2012)** en variedades analizadas. Así, las variedades Amarilla Miquihuana, “Naranjona”, Amarilla Venado y Cardona presentaron un contenido similar al reportado por los mismos autores en algunas de sus variedades analizadas, como Tapón Aguanoso y Moradilla 1. Sin embargo, **Bariza et al. (2017)** reportaron un contenido de cenizas en tunas argelinas de 2.45 %, lo cual no coincide con ninguna de las variedades evaluadas en el presente estudio, encontrándose estas últimas considerablemente por encima de este valor. Por otro lado, las variedades Cristalina y Reyna 2 coincidieron con lo reportado por **Paucara (2017)** para tuna blanca (0.34 %). Asimismo, las variedades Roja San Martín y Charola coincidieron con lo reportado por el mismo autor para tuna roja (0.38 %); y, de la misma manera, la variedad Pico Chulo coincidió con lo reportado por **Paucara (2017)** para tuna naranja (0.35 %).

Asimismo, **Valero-Galván et al. (2021)** reportaron un contenido de cenizas en tuna mayor de lo encontrado en el presente estudio, encontrándose 4.906 veces menos entre el contenido más alto determinado en el presente estudio (Cardona: 0.53 %_{bh}; **Anexo 1**) y el contenido más bajo determinado por **Valero-Galván et al. (2021)** en *O. ficus-indica* de tuna roja (2.6%_{bs}).

Así, el contenido de cenizas en la tuna concuerda con el rango del contenido de cenizas en distintos tipos de frutas (**Gebhardt & Thomas, 2002; Nielsen, 2017**).

6.1.1.6. ELN

Por último y no menos importante, el ELN agrupa a todos los macronutrientes (junto con algunos micronutrientes) no evaluados con los métodos dentro del AQP, constituyéndose esencialmente de carbohidratos digeribles (mono-, oligo- y polisacáridos), pero también cierta de cantidad de vitaminas y otros micronutrientes como compuestos orgánicos solubles,

todo sin nitrógeno en su estructura (**Olvera *et al.*, 1993**), aunque comúnmente se puede considerar como el contenido neto de carbohidratos. Así, se encontró que en variedades verde-blancas el contenido del ELN, o bien, de carbohidratos (**Tabla 7**) fue significativamente mayor ($p < 0.05$) al resto de las variedades de tuna con más del 15.00 %_{bh}. Por otro lado, las variedades que presentaron el menor contenido de ELN de manera significativa ($p < 0.05$) fueron principalmente la Amarilla Plátano y la Roja San Martín, con un contenido menor al 12.00 %_{bh}. Sin embargo, absolutamente todas las variedades evaluadas en el presente estudio presentaron un contenido mayor al reportado por **Paucara (2017)** para carbohidratos.

Asimismo, **Lamghari *et al.* (1998)** reportaron un contenido de carbohidratos solubles en nitrógeno del 58.30 %_{bs} y un contenido de almidón del 4.55 %_{bs}, que en conjunto conforman un 62.85 %_{bs} de carbohidratos totales, lo cual coincide con el ELN evaluado en las variedades Cardona y Roja Pelona con 62.50 y 60.76 %_{bs}, respectivamente, como se puede observar en el **Anexo 1**.

Así, el contenido de carbohidratos en la tuna concuerda con el contenido de carbohidratos en distintos tipos de frutas, como aguacate, mango, piña, entre otras, de acuerdo con lo publicado por **Gebhardt & Thomas (2002)**. De manera general, se observó que todos los frutos, independientemente de su origen (Altiplano Mexicano o Valle de Teotihuacán), presentaron contenidos de sus macrocomponentes, en promedio, muy similares entre cada región donde, además, se encontró cierta concordancia con datos de composición de otras frutas estudiadas (**Gebhardt & Thomas, 2002; Nielsen, 2017**).

Tabla 7. Composición química de variedades de tuna (*Opuntia* spp.) del Altiplano Mexicano y del Valle de Teotihuacán, en base húmeda (g/100 g_{bh}).

Origen	Variedad	Humedad	Materia Seca	Proteína Cruda*	Lípidos Crudos	Fibra Cruda	Cenizas	ELN
	Cristalina	79.85 ± 0.04 abc	20.15 ± 0.04 def	1.05 ± 0.01 fg	1.49 ± 0.05 j	2.14 ± 0.08 a	0.37 ± 0.01 cd	15.11 ± 0.00 f
	Amarilla Montesa	81.64 ± 0.59 ef	18.36 ± 0.59 ab	1.02 ± 0.03 f	0.93 ± 0.03 ef	2.89 ± 0.06 b	0.33 ± 0.00 abc	13.19 ± 0.65 cd
	Amarilla Venado	80.64 ± 0.12 cde	19.37 ± 0.12 bcd	0.95 ± 0.05 e	1.04 ± 0.04 fg	3.37 ± 0.01 c	0.49 ± 0.02 fg	13.53 ± 0.21 de
SLP	Cardona	79.46 ± 0.02 b	20.55 ± 0.02 ef	1.09 ± 0.03 g	1.07 ± 0.06 gh	5.02 ± 0.02 e	0.53 ± 0.01 g	12.84 ± 0.10 bcd
	Roja Pelona	79.79 ± 0.41 abc	20.21 ± 0.41 def	0.69 ± 0.01 ab	0.21 ± 0.01 a	6.73 ± 0.40 h	0.31 ± 0.01 ab	12.29 ± 0.83 abcd
	“ Naranjona”	81.21 ± 0.16 def	18.80 ± 0.16 abc	0.63 ± 0.03 a	0.27 ± 0.01 a	5.25 ± 0.20 e	0.48 ± 0.04 f	12.17 ± 0.37 abc
	Charola	79.06 ± 0.17 a	20.94 ± 0.17 f	1.28 ± 0.02 i	1.64 ± 0.16 k	5.97 ± 0.07 g	0.40 ± 0.01 de	11.65 ± 0.24 ab
	Reyna 1	79.81 ± 0.15 abc	20.20 ± 0.15 def	0.72 ± 0.04 b	1.31 ± 0.01 i	2.68 ± 0.16 b	0.29 ± 0.03 a	15.20 ± 0.10 f
	Reyna 2	79.99 ± 0.20 abc	20.01 ± 0.20 def	0.81 ± 0.02 c	0.76 ± 0.04 d	3.50 ± 0.11 c	0.35 ± 0.01 bcd	14.59 ± 0.28 ef
Edomex	Pico Chulo	80.44 ± 0.02 bcd	19.57 ± 0.02 cde	0.92 ± 0.01 de	0.86 ± 0.03 de	5.34 ± 0.08 ef	0.34 ± 0.02 abc	12.11 ± 0.11 abc
	Roja San Martín	82.31 ± 1.53 f	17.70 ± 1.53 a	1.16 ± 0.04 h	0.43 ± 0.04 b	3.89 ± 0.01 d	0.39 ± 0.04 de	11.84 ± 1.55 ab
	Amarillo Plátano	80.70 ± 0.77 cde	19.31 ± 0.77 bcd	0.88 ± 0.03 d	1.19 ± 0.09 hi	5.65 ± 0.23 fg	0.42 ± 0.01 e	11.17 ± 0.47 a
Tamps.	Amarilla Miquihuana	81.44 ± 0.44 def	18.56 ± 0.44 abc	0.75 ± 0.00 bc	0.59 ± 0.01 c	3.55 ± 0.27 cd	0.47 ± 0.04 f	13.20 ± 0.74 cd

* Factor de 6.25 para conversión de nitrógeno a proteína.

** Los resultados son valores promedio de 2 réplicas por cada muestra evaluada.

*** Distintas letras indican diferencia estadísticamente significativa entre las muestras, $\alpha = 0.05$ ($p < 0.05$).

6.1.2. Perfil de minerales

6.1.2.1. Calcio

El consumo de calcio (Ca) es de gran importancia para el cuerpo humano, ya que, tras su absorción, ayuda a la formación de huesos y dientes (**Badui, 2006**). En cuanto al calcio presente en tuna, se encontró que la Reyna 1 fue la variedad con mayor contenido de este mineral en su composición, con 125.862 mg/100 g de pulpa fresca (**Tabla 8**), siendo significativamente superior ($p < 0.0001$) al resto de variedades evaluadas, incluyendo la Reyna 2, donde se observó un contenido de calcio significativamente menor ($p < 0.0001$). Asimismo, las variedades “Naranjona” y Cardona presentaron un contenido elevado con respecto al resto de variedades (excepto la Reyna 1). Por otro lado, se determinó que la variedad Amarillo Plátano fue aquella con menor contenido de calcio, de forma significativa ($p < 0.0001$), con respecto a todas las variedades analizadas. De esta manera, se encontró que lo determinado para la variedad Amarilla Venado (38.624 mg/100 g) coincide con lo reportado por **Paucara (2017)** en tuna naranja (39.59 mg/100 g); de igual forma, se encontró concordancia con la variedad Cristalina (37.622 mg/100 g) y lo reportado por el mismo autor en tuna roja (37.39 mg/100 g), aunque también cercano a lo reportado en tuna blanca (34.09 mg/100 g).

El-Gharras et al. (2006) reportaron un contenido promedio de calcio en tunas marroquíes maduras de 214.60 mg/kg, lo cual se encuentra cercano a lo encontrado en la tuna Amarilla Miquihuana (201.31 mg/kg), como se puede observar en el **Anexo 2**; sin embargo, se encontró una gran variabilidad en el contenido de este mineral en otras tunas, con base en lo reportado por los mismos autores. Sin embargo, en la Roja Pelona (307.30 mg/kg), el resultado coincide con lo reportado por **Dehbi et al. (2014)** en tuna marroquí (314 mg/kg en variedad *Ben Guerir*).

Por otro lado, el contenido de este mineral, en base seca (**Anexo 3**), únicamente en la variedad Roja Pelona (152.06 mg/100 g_{bs}) fue cercano a lo reportado por **Lamghari et al. (1998)** en tuna francesa, con un contenido de calcio de 163 mg/100 g_{bs}. Asimismo, se encontró que la variedad Cardona presentó un contenido de calcio en base seca (312.696

mg/100 g bs) similar al reportado por **Chiteva & Wairagu (2013)** de tuna keniana con 316.5 mg/100 g bs.

De esta manera, se encontró coincidencia en lo mencionado por diversos autores (**Stintzing et al., 2001; Moßhammer et al., 2006**) en que uno de los minerales que se encuentran en la pulpa de tuna en mayor abundancia es el calcio.

Asimismo, se pudo observar un contenido de este mineral similar a la tuna en algunas frutas mexicanas (8.555 – 125.862 mg/100 g), como la jícama (20 mg/100 g), lima (15 mg/100 g), limón (38 mg/100 g), mamey (35 mg/100 g), naranja (56 mg/100 g), papaya (16 mg/100 g), ciruela pasa (51 mg/100 g), y pasa (uva pasa; 72 mg/100 g), y un mayor contenido que otras frutas como la manzana, aguacate, uva, ciruela (perfumada y Wilson), y el plátano macho (**Sanchez-Castillo et al., 1998**).

6.1.2.2. Potasio

Se encontró que el contenido de potasio (K) en pulpa fresca en las variedades de tuna fue significativamente mayor ($p < 0.0001$) en la variedad Reyna 1 (0.843 mg/100 g de pulpa fresca), encontrándose también en la Reyna 2 un contenido 0.159 veces lo encontrado para el fruto menos maduro (Reyna 1). Por otro lado, se determinó que el fruto con menor contenido de este mineral fue la Amarilla Montesa ($p < 0.0001$), seguida de la Amarillo Plátano, Reyna 2, Charola y Roja San Martín, no encontrándose diferencia significativa entre estas últimas (**Tabla 8**).

El-Gharras et al. (2006) reportaron un contenido promedio de potasio en tunas marroquíes maduras de 1839.08 mg/kg, mientras que lo reportado **Dehbi et al. (2014)** en tuna marroquí, fue entre 1243 – 2209 mg/kg, superior a lo encontrado en el presente estudio, como se puede observar en el (**Anexo 2**).

Por otro lado, el contenido de este mineral, en base seca (**Anexo 3**), tampoco fue cercano en ninguna de las tunas evaluadas (máximo 4.172 mg/100 g_{bs} en Reyna 1) a lo reportado por **Lamghari et al. (1998)** en tuna francesa con 559 mg/100 g_{bs}, mientras que **Chiteva & Wai-ragu (2013)** en tuna keniana reportaron 108.8 mg/100 g_{bs}; lo cual muestra un bajo contenido de potasio en todas las variedades evaluadas en el presente estudio.

6.1.2.3. Zinc

El zinc (Zn) es un metal de importancia para el metabolismo, actuando como cofactor en distintas enzimas, como en la síntesis de ácidos nucleicos y proteínas, metabolismo de carbohidratos y vitamina A. Obtenido mediante la dieta, aunque se ha observado que los vegetales no poseen gran cantidad de este elemento (**Badui, 2006; Kan & Chen, 2021**). Se encontró que la Reyna 1 fue la variedad con mayor contenido de zinc en su composición, con 1.546 mg/100 g de pulpa fresca (**Tabla 8**), siendo significativamente mayor ($p < 0.0001$) al resto de variedades evaluadas, incluyendo Reyna 2, donde se observó un contenido de zinc 0.402 veces menor, quizás debido a una reducción de este mineral a lo largo del desarrollo fisiológico del fruto. Asimismo, las variedades Pico Chulo, Roja San Martín y Reyna 2 presentaron un contenido elevado con respecto al resto de variedades (excepto la Reyna 1). Por otro lado, se determinó que la variedad “Naranjona” fue aquella con menor contenido de zinc, de forma significativa ($p < 0.0001$), con respecto a todas las variedades analizadas.

El-Gharras et al. (2006) y **Dehbi et al. (2014)** reportaron contenidos similares de este mineral en muestras de tuna madura (marroquí), reportando un rango de 0.15 – 0.58 mg/kg, valores superiores a lo encontrado en las distintas variedades de tuna del presente estudio (**Anexo 2**).

Por otro lado, el contenido de este mineral, en base seca (**Anexo 3**), solamente en la variedad “Naranjona” (1.430 mg/100 g_{bs}) fue cercano a lo reportado por **Lamghari et al.**

(1998) en tuna francesa, con un contenido de zinc de 1.55 mg/100 g_{bs}. Sin embargo, no se encontró concordancia con lo reportado por **Chiteva & Wairagu (2013)** de tuna keniana con 12.6 mg/100 g_{bs}, pues el contenido máximo determinado de este mineral, en la variedad Reyna 1, fue de 7.652 mg/100 g_{bs}, encontrando valores menores en las variedades evaluadas en comparación de la tuna francesa.

6.1.2.4. Fósforo

El fósforo (P) generalmente se encuentra como fosfatos en los alimentos y en la naturaleza, relacionado ampliamente con el calcio para la formación de hidroxiapatita (hueso y dientes), así como amortiguador de pH en sangre, y en el metabolismo de proteínas, lípidos y carbohidratos (**Badui, 2006**). Así, en cuanto al fósforo presente en tuna, se encontró que la Reyna 1 fue la variedad con mayor contenido de este elemento en su composición, con 0.127 mg/100 g de pulpa fresca (**Tabla 8**), siendo significativamente mayor ($p < 0.0001$) al resto de variedades evaluadas, incluyendo Reyna 2, donde se observó un contenido de fósforo 2.54 veces menor ($p < 0.0001$). Asimismo, las variedades Amarilla Miquihuana y Roja San Martín presentaron un contenido mayor respecto al resto de variedades (excepto la Reyna 1). Por otro lado, se determinó que las variedades Cardona, Roja Pelona y Pico Chulo presentaron un contenido de fósforo de 0.003 mg/100 g ($p < 0.0001$), mientras que en las variedades Amarilla Montesa, Amarilla Venado y Amarillo Plátano (variedades amarillo-naranjas) no se detectó la presencia de este elemento. Estos resultados no coinciden con lo reportado por **Paucara (2017)**, quien reportó un contenido de fósforo en tuna roja (23.62 mg/100 g), naranja (22.17 mg/100 g), y blanca (20.82 mg/100 g).

También, se determinó una menor cantidad de fósforo en las variedades de tuna evaluadas (**Anexo 2**) a comparación de lo reportado en tuna marroquí por **Dehbi et al. (2014)**.

Por otro lado, el contenido de este elemento, en base seca (**Anexo 3**), en la variedad Cristalina (0.080 mg/100 g_{bs}) fue lo más cercano a lo reportado por **Lamghari et al. (1998)**

en tuna francesa, con un contenido de fósforo de 0.063 mg/100 g_{bs}. Asimismo, se encontró que todas las variedades de tuna evaluadas presentaron un contenido de fósforo mayor a lo reportado por **Chiteva & Wairagu (2013)** en tuna keniana con 0.05 mg/100 g_{bs}, a excepción de la variedad Pico Chulo, cuyo contenido de fósforo en pulpa fue 3.333 veces menor.

6.1.2.5. Hierro

Por otro lado, el hierro (Fe) es un elemento de gran importancia, principalmente para el transporte y almacenamiento de oxígeno dentro del organismo, además de funcionar como un cofactor en distintas enzimas. Este metal se obtiene a través de la dieta, encontrándose en alimentos de origen animal y vegetal, en estos últimos se encuentran en forma inorgánica (**Badui, 2006**). De esta manera, se encontró que la Reyna 1 fue la variedad con mayor contenido de este mineral en composición, con 3.054 mg/100 g de pulpa fresca (**Tabla 8**), siendo significativamente mayor ($p < 0.0001$) al resto de variedades evaluadas, incluyendo Reyna 2. Asimismo, las variedades Amarilla Venado, Charola y Pico Chulo presentaron un contenido elevado con respecto al resto de variedades (excepto la Reyna 1). Por otro lado, se determinó que la variedad Amarillo Plátano fue aquella con menor contenido de hierro, con respecto a todas las variedades analizadas ($p < 0.0001$), siendo significativamente iguales ($p > 0.05$) con las variedades Roja San Martín, “Naranjona” y Roja Pelona.

También, como se puede observar en el **Anexo 2**, se determinó similitud entre el contenido de hierro cuantificado en las variedades Reyna 2 (8.393 mg/kg) y Cardona (9.535 mg/kg) con lo reportado por **Dehbi et al. (2014)** en tuna marroquí, presentando similitud con la variedad *Yellow Khouribga* (8.64 mg/kg), y las variedades *Ras Elain* (9.5 mg/kg) y *Alkalaa* (9.58 mg/kg), respectivamente.

Por otro lado, el contenido de este mineral, en base seca (**Anexo 3**), únicamente en la variedad Pico Chulo (14.418 mg/100 g_{bs}) fue cercano a lo reportado por **Lamghari et al.**

(1998) en tuna francesa, con un contenido de hierro de 16.5 mg/100 g_{bs}. Asimismo, se encontró que la variedad Reyna 1 presentó un contenido de hierro en base seca (30.539 mg/100 g_{bs}) similar al reportado por **Chiteva & Wairagu (2013)** de tuna keniana con 25.9 mg/100 g_{bs}.

6.1.2.6. Selenio

Por su parte, el selenio (Se) presenta una función antioxidante en el cuerpo, como cofactor de enzimas que remueven peróxidos, protegiendo así a las células del daño oxidativo, así como en la prevención de enfermedades cardiovasculares. Y la presencia de este metal en alimentos depende de su presencia en el agua que entra en contacto con estos y su suelo (**Kan & Chen, 2021**). Se encontró que la tuna, de manera general, presenta un contenido muy bajo de este mineral (1.927 – 11.277 µg/100 g; **Tabla 8**), a comparación de otros minerales. Sin embargo, se encontró que la tuna Cardona fue aquella con el mayor contenido de selenio ($p < 0.0001$) con respecto al resto de variedades, con 11.277 µg/100 g, a diferencia de las variedades Charola y Reyna (1 y 2), cuyo contenido fue de 4.372 – 4.859 µg/100 g. Asimismo, se observó que las variedades con el menor contenido de selenio ($p < 0.0001$) fueron la Pico Chulo y la Amarilla Montesa con selenio entre 1.927 – 2.326 µg/100 g. Los resultados obtenidos en el presente estudio coincidieron con lo reportado por **Morris & Levander (1970)** en distintas frutas y vegetales, teniendo la tuna un contenido similar a la zanahoria, repollo, champiñones, cebolla, rábano, plátano y naranja; y mayor que algunos otros como la coliflor, maíz, pimiento verde, ejotes, lechuga, papa, jitomate, nabo, manzana, durazno, pera, y piña. En vista de esto, junto con lo reportado por **Combs (1988)**, se puede decir que la tuna es un fruto con alto contenido de selenio, a comparación de otros frutos y vegetales, aunque bajo a comparación de cereales, algunas nueces y semillas, y especialmente de alimentos de origen animal, como la carne (roja, vísceras, procesada, de ave, pescado y mariscos).

También, como se puede observar en el **Anexo 2**, se encontró similitud entre lo determinado en el presente estudio con lo reportado por **Navarro-Alarcon & Cabrera-Vique**

(2008) en algunas frutas y vegetales como manzana (30 – 50 ng/g), uvas (40 – 76 ng/g) y papa (30 – 70 ng/g).

Por otro lado, el contenido de este mineral, en base seca (**Anexo 3**), se encontró que la tuna Roja San Martín también presenta uno de los contenidos más altos de este mineral (menor al de la Cardona) con 23.326 $\mu\text{g}/100 \text{ g}_{\text{bs}}$.

6.1.2.7. Cobre

Finalmente, pero no menos importante, el cobre (Cu) tiene una importante función en la formación de enzimas, así como cofactor en estas, ayuda en la absorción de hierro en el tracto gastrointestinal, también para mantener la elasticidad e hidratación de la piel, y los pigmentos y estructura de cabello, entre otras funciones. Al igual que el zinc, este elemento se encuentra en alimentos de origen animal y vegetal, pero es en estos últimos en los que en menor cantidad se encuentra (**Kan & Chen, 2021**). En cuanto al cobre presente en tuna, se encontró que la Reyna 1 fue la variedad con mayor contenido de este mineral en su composición, con 0.972 mg/100 g de pulpa fresca (**Tabla 8**), siendo significativamente mayor ($p < 0.0001$) al resto de variedades evaluadas, incluyendo Reyna 2, donde se observó un contenido de cobre 12.304 veces menor ($p < 0.0001$). Asimismo, las variedades Cristalina, Roja Pelona, Pico Chulo, Cardona y Charola presentaron un contenido elevado de cobre con respecto al resto de variedades (excepto la Reyna 1). Por otro lado, se determinó que las variedades Reyna 2, Roja San Martín y Amarilla Montesa fueron aquellas con menor contenido de cobre ($p < 0.0001$), con respecto al resto de variedades analizadas.

El-Gharras et al. (2006) reportaron un contenido promedio de cobre en tunas marroquíes maduras de 0.19 mg/kg, en el presente estudio las muestras tuvieron un contenido de 1.858 veces mayor que lo reportado por los mismos autores (**Anexo 2**). Se encontró similitud entre el contenido de cobre cuantificado en la variedad Amarilla Montesa (0.486 mg/kg) con lo reportado por **Dehbi et al. (2014)** en tuna marroquí en la variedad *Ait Baamrane* (0.46

mg/kg); sin embargo, de manera general las variedades evaluadas en el presente estudio presentan un contenido mayor de cobre en su pulpa a comparación de tuna marroquí.

Por otro lado, el contenido de este mineral, en base seca (**Anexo 3**), en las variedades Roja San Martín (0.199 mg/100 g_{bs}), Reyna 2 (0.394 mg/100 g_{bs}), Amarilla Montesa (0.265 mg/100 g_{bs}) y Amarilla Venado (0.565 mg/100 g_{bs}) coincidieron con lo reportado por **Lamghari et al. (1998)** en tuna francesa, con un contenido de cobre menor a 0.78 mg/100 g_{bs}. Sin embargo, se encontró que todas las variedades de tuna del presente estudio mostraron un contenido de cobre en base seca mayor al reportado por **Chiteva & Wairagu (2013)** de tuna keniana con 0.01 mg/100 g_{bs}.

Tabla 8. Perfil de minerales (mg/100 g) presentes en pulpa de variedades de tuna (*Opuntia* spp.) del Altiplano Mexicano y del Valle de Teotihuacán.

Origen	Variedad	Ca	K	Zn	P	Fe	Se (µg/100 g)	Cu
	Cristalina	37.622 ± 0.381 e	0.151 ± 0.004 b	0.506 ± 0.009 cd	0.005 ± 0.021 b	1.163 ± 0.283 ef	3.511 ± 0.359 cd	0.251 ± 0.047 abc
	Amarilla Montesa	15.241 ± 0.285 b	0.107 ± 0.001 a	0.373 ± 0.013 b	ND a	0.644 ± 0.109 c	2.326 ± 0.126 ab	0.049 ± 0.000 a
	Amarilla Venado	38.624 ± 1.454 e	0.145 ± 0.004 b	0.388 ± 0.013 b	ND a	1.211 ± 0.109 efg	2.688 ± 0.185 b	0.109 ± 0.078 ab
SLP	Cardona	64.259 ± 2.720 g	0.209 ± 0.008 c	0.541 ± 0.020 cde	0.057 ± 0.007 c	0.953 ± 0.153 de	11.277 ± 0.784 h	0.313 ± 0.042 bc
	Roja Pelona	30.730 ± 0.605 d	0.214 ± 0.012 c	0.561 ± 0.019 def	0.003 ± 0.000 a	0.352 ± 0.000 ab	3.903 ± 0.314 de	0.277 ± 0.040 bc
	“ Naranjona”	63.678 ± 0.869 g	0.258 ± 0.006 d	0.269 ± 0.024 a	0.003 ± 0.000 a	0.351 ± 0.000 ab	3.257 ± 0.242 c	0.216 ± 0.000 ab
	Charola	49.281 ± 0.773 f	0.135 ± 0.001 ab	0.387 ± 0.009 b	0.050 ± 0.002 c	1.283 ± 0.001 fg	4.859 ± 0.249 g	0.468 ± 0.001 c
	Reyna 1	125.862 ± 2.024 h	0.843 ± 0.075 e	1.546 ± 0.068 h	0.127 ± 0.005 e	3.054 ± 0.346 h	4.372 ± 0.299 efg	0.972 ± 0.547 d
	Reyna 2	15.362 ± 0.481 b	0.134 ± 0.001 ab	0.622 ± 0.068 g	0.050 ± 0.008 c	0.839 ± 0.285 cd	4.442 ± 0.274 fg	0.079 ± 0.051 a
Edomex	Pico Chulo	15.227 ± 0.955 b	0.138 ± 0.002 b	0.568 ± 0.018 efg	0.003 ± 0.000 a	1.442 ± 0.138 g	1.927 ± 0.134 a	0.304 ± 0.000 bc
	Roja San Martín	18.849 ± 0.720 c	0.137 ± 0.001 ab	0.598 ± 0.085 fg	0.074 ± 0.013 d	0.348 ± 0.000 ab	4.129 ± 0.211 ef	0.035 ± 0.051 a
	Amarillo Plátano	8.555 ± 0.191 a	0.121 ± 0.002 ab	0.370 ± 0.025 b	ND a	0.330 ± 0.094 a	3.853 ± 0.191 de	0.174 ± 0.000 ab
Tamps-	Amarilla Miquihuana	20.131 ± 0.396 c	0.147 ± 0.005 b	0.501 ± 0.018 c	0.068 ± 0.002 d	0.603 ± 0.279 bc	3.470 ± 0.195 cd	0.223 ± 0.000 ab

* Los resultados son valores promedio de 4 réplicas para Ca, K, Zn, Fe y Cu, y 3 réplicas para Se, por cada muestra evaluada.

** Distintas letras indican diferencia estadísticamente significativa entre las muestras, $\alpha = 0.05$ ($p < 0.05$).

*** ND: No Detectable.

6.1.3. Parámetros fisicoquímicos

6.1.3.1. Sólidos solubles

Por otro lado, en cuanto a los parámetros fisicoquímicos evaluados en las tunas (**Tabla 9**), los grados Brix fueron cercanos a lo reportado por **Chavez-Santoscoy et al. (2009)** (8.08 – 14.73 °Bx). Se determinó diferencia significativa entre las muestras ($p < 0.0001$), siendo la Reyna 2 la muestra con mayor contenido de sólidos totales, junto con la Roja San Martín. Asimismo, la Reyna 2 presentó un mayor contenido de sólidos solubles que la Reyna 1, lo cual se esperaba (**Paucara, 2017**) debido a que la Reyna 2 estaba en un estado de maduración más avanzado que la Reyna 1. También, se determinó que las tunas Cardona, Amarillo Plátano, Charola, Amarilla Montesa y Roja Pelona fueron aquellas con el menor contenido de sólidos solubles (11.170 – 12.550 °Bx). De manera general, se observó que aquellos frutos provenientes del Valle de Teotihuacán mostraron un contenido promedio de sólidos solubles (13.4 °Bx) ligeramente mayor a aquellas tunas originarias del Altiplano Mexicano (12.7 °Bx). Se pudo observar también que los sólidos solubles en más de la mitad de las variedades evaluadas en el presente estudio fueron mayores al ELN, por lo que se puede suponer la presencia de componentes hidrosolubles que sí contienen nitrógeno en su estructura, como bases nitrogenadas, ciertas vitaminas, e incluso algunas proteínas hidrosolubles. Por otro lado, de acuerdo con **Moßhammer et al. (2006)**, el rango óptimo en el que se encuentra el contenido de sólidos solubles en tuna es de entre 12 – 17 %, encontrándose la mayoría de las variedades evaluadas dentro de este rango; y siendo la tuna Cardona una de las variedades con menor °Brix. También, **Sumaya-Martínez et al. (2011)** reportaron valores de sólidos solubles de 13.4, 14.8, 14.4 y 13.5 °Bx para las variedades (Roja) San Martín, Picochulo, Reina y Cristalina, respectivamente, donde esta última presentó un valor similar (0.92 veces menor) a lo reportado por los mismos autores. Además, las variedades Reyna evaluadas se encontraron por debajo (Reyna 1) y por encima (Reyna 2) de lo reportado por **Sumaya-Martínez et al. (2011)**. Sin embargo, las variedades Pico Chulo y Roja San Martín presentaron un contenido de sólidos solubles diferente a lo reportado por los mismos autores. Asimismo, la mayoría de las variedades evaluadas en el presente estudio presentaron un contenido de sólidos solubles, de manera general, superior a lo reportado en variedades de tuna roja por **Aquino et al. (2012)**. De esta manera, algunas de las variedades de tuna roja del

presente estudio (Cardona, Charola y Roja Pelona) fueron las que presentaron el contenido de sólidos solubles más cercano a lo reportado por los mismos autores, así como algunas de las variedades amarillo-anaranjadas (Amarilla Montesa y Amarillo Plátano) con lo reportado en las variedades fenotípicamente similares (amarillo-anaranjadas) por los mismos autores. Adicionalmente, la variedad Roja San Martín presentó un contenido de sólidos solubles 0.992 veces menor a lo reportado por **Alba (2013)**. Por otro lado, **Dehbi et al. (2014)** reportaron valores de sólidos solubles de 11.33 – 15.47 °Bx para variedades verde-amarillo-anaranjadas de tuna marroquí, lo cual coincide con las variedades de tuna analizadas del mismo color; sin embargo, las variedades de tonalidades rosa-rojo-moradas presentaron valores menores al reportado por el mismo autor (13.42 °Bx) a excepción de la variedad Roja San Martín, la cual presentó un contenido de sólidos solubles ligeramente mayor. También, los valores de sólidos solubles de las variedades Roja Pelona, Amarilla Montesa, Pico Chulo, Cardona y Charola son considerablemente menores a lo reportado por **Zenteno-Ramírez et al. (2015)**, pudiéndose deber a la sequía (al tratarse en su mayoría de variedades originarias de SLP), con mayor materia insoluble, como fibra, y menor humedad y sólidos solubles. Asimismo, en un estudio realizado por **Monroy-Gutiérrez et al. (2017)**, reportaron valores del contenido de sólidos solubles para las variedades Amarilla Montesa, Amarillo Plátano, Reyna, Cristalina y Rojo Pelón (Roja Pelona), siendo 1.220 veces, 1.075 veces, 0.979 veces (0.852 veces, para Reyna 2), 1.019 veces, y 1.052 veces, respectivamente, a lo encontrado en las mismas variedades de tuna. Así, la tuna Amarilla Montesa tuvo un contenido menor, y la Reyna 2 un contenido de sólidos solubles mayor al reportado por los mismos autores. Algo importante a notar es que la mayoría de los sólidos solubles corresponden a azúcares reductores, principalmente glucosa y fructosa (**Lamghari et al., 1998; Moßhammer et al., 2006**), pero también de otros componentes como otros azúcares no reductores (sacarosa en muy baja cantidad), vitaminas hidrosolubles, minerales, entre otros (**Nielsen, 2017**).

Así, el contenido de sólidos solubles en tuna concuerda con el contenido de sólidos solubles de algunas frutas, como la manzana, cereza, arándano, limón, uva, lima, naranja, durazno, pera, piña, frambuesa, de acuerdo con lo publicado por **Nielsen (2017)**, entre otras.

6.1.3.2. pH

Los valores de pH de las muestras evaluadas presentaron diferencia significativa ($p < 0.05$) en todas las variedades de tuna, siendo la Amarilla Venado la muestra con un valor mayor de pH (6.59), en relación con el resto de las muestras ($p < 0.0001$); asimismo, la tuna Amarilla Venado fue 1.433 veces mayor que la “Naranjona”. En similitud con la acidez titulable, la variedad Cardona, que se encontraba en un estado de maduración elevado, presentó un pH bajo, conteniendo ácidos orgánicos en alta concentración predominando en este valor de pH. También, se pudo observar que, de manera muy general, las variedades de tuna provenientes del Valle de Teotihuacán mostraron un pH promedio (6.25) mayor (menor acidez aparente) que aquellas originarias del Altiplano Mexicano (5.68). Por otro lado, las variedades Cardona, Roja Pelona, Reyna (1 y 2), y “Naranjona” presentaron valores menores a lo reportado por **Delgado & Pimienta-Barrios (1994: citados por Pimienta-Barrios, 1994)**, siendo frutos más ácidos a lo encontrado por los mismos autores. También, la tuna Reyna 2 tiene un pH significativamente mayor que la Reyna 1, lo cual coincide con lo mencionado por Al-Maiman & Ahmad (2002). De acuerdo con lo reportado por **Chavez-Santoscoy et al. (2009)**, el rango de valores de pH que determinó fue de entre 4.27 – 5.46, lo cual podría implicar que se encuentran en un estado de maduración elevado; sin embargo, **Moßhammer et al. (2006)** mencionan que, de manera general, las tunas (*Opuntia* spp.) presentan un rango de pH de 5.6 – 6.5, lo cual coincide con lo determinado en la mayoría de las variedades analizadas del Altiplano Mexicano y el Valle de Teotihuacán, siendo la variedad “Naranjona” una tuna significativamente ($p < 0.0001$) más ácida que el resto. Asimismo, las variedades Roja San Martín, Pico Chulo y Reyna 2 presentaron un pH mayor al reportado por **Sumaya-Martínez et al. (2011)**; mientras que las variedades Reyna 1 y Cristalina mostraron un pH mayor al reportado por los mismos autores. La mayoría de las variedades evaluadas en el presente estudio presentaron un pH, de manera general, superior a lo reportado por **Aquino et al. (2012)** en variedades de tuna roja. Adicionalmente, la variedad Roja San Martín presentó un pH 0.964 veces menor a lo reportado por **Alba (2013)**, donde hay que considerar que, aunque los valores no son tan lejanos entre sí, se trata de una escala logarítmica, teniendo una influencia importante en el contenido de iones H^+ . En un estudio realizado por **Dehbi et**

al. (2014) se encontró que, en variedades verde-amarillo-anaranjadas de tuna marroquí, el pH reportado fue entre 5.27 – 5.95, lo cual implica que las variedades Amarilla Venado, “Naranjona”, Reyna 2, Pico Chulo, Amarillo Plátano y Amarilla Miquihuana son variedades con menor acidez aparente, o bien, menor carácter ácido. Asimismo, las variedades Roja Pelona, Amarilla Montesa, Pico Chulo y Charola presentaron valores considerablemente menores de pH con respecto a lo reportado por **Zenteno-Ramírez et al.** (2015), aunque en comparación de lo reportado por este autor con la variedad Picho Chulo, el pH de esta variedad fue similar.

6.1.3.3. Acidez titulable

Por otro lado, en la acidez titulable de las muestras de tuna, se observó diferencia significativa ($p < 0.0001$) entre las variedades Reyna (1 y 2), presentando la Reyna 1 una mayor acidez titulable. Esto se encuentra relacionado con el estado de maduración de los frutos, encontrándose más ácido cuanto menos maduro el fruto. También, se puede ver que la variedad Cardona, es uno de los frutos con mayor estado de maduración incluso con algunos de sus frutos llegando a la fermentación a su llegada, presentando uno de los niveles de acidez titulable más altos. Sin embargo, la variedad “Naranjona” fue la variedad que presentó naturalmente la mayor acidez titulable ($p < 0.0001$) con una acidez de 0.493 % ác. cít. Asimismo, se puede decir que, de manera general, variedades de tuna provenientes del Altiplano Mexicano (0.194 %) fueron las que presentaron los valores más elevados de acidez, en promedio, en comparación con las tunas del Valle de Teotihuacán (0.139 %). De acuerdo con una revisión realizada por **Moshammer et al.** (2006), el contenido de acidez titulable en tunas se encuentra en un rango de 0.5 – 1.1 g/L, o bien, 0.05 – 0.11 %, de tal forma que más de la mitad de las variedades de tuna salen de este rango mencionado, contando con variedades de elevada acidez y algunas otras de baja acidez. Asimismo, **Medina et al.** (2007) reportaron una acidez titulable en variedades verdes y anaranjadas de tuna (*O. ficus-indica*) de 0.072 y 0.086 g de ácido cítrico anhidro/100 g (% ácido cítrico), respectivamente. Esto, en comparación con los resultados obtenidos, son valores bajos. Sin embargo, las variedades Amarilla Venado, Reyna 2 y Amarilla Miquihuana presentaron una menor acidez que las variedades reportadas por el mismo autor. Por otro lado, las variedades Cristalina y Roja San Martín

presentaron un contenido de acidez muy cercano a lo reportado por el mismo autor. La mayoría de las variedades evaluadas en el presente estudio presentaron una acidez titulable, de manera general, superior a lo reportado por **Aquino et al. (2012)** en variedades de tuna roja, siendo de manera similar las variedades Amarilla Venado, Reyna 2, Cristalina, y Roja San Martín, tratándose principalmente de variedades con tonalidades verde-amarillo-anaranjadas. Por otro lado, **Bariza et al. (2017)** reportaron una acidez titulable en pulpa de tunas de 0.37 %, siendo las variedades Cardona (quizás por su estado de maduración) y Pico Chulo las variedades con la acidez titulable más cercanas; mientras que la variedad “Naranjona” presentó una acidez titulable 1.332 veces mayor que lo reportado por los mismos autores. **Monroy-Gutiérrez et al. (2017)** reportaron valores de acidez titulable para las variedades Amarilla Montesa, Amarillo Plátano, Reyna, Cristalina y Rojo Pelón (Roja Pelona), siendo 0.178 veces, 0.879 veces, 0.454 veces (2.353 veces, para Reyna 2), 0.909 veces, y 0.261 veces, respectivamente, lo encontrado en las mismas variedades de tuna. Así, las variedades Amarilla Montesa, Reyna 1, y Roja Pelona presentaron una acidez titulable por encima a lo reportado por los mismos autores, mientras que la tuna Reyna 2 presentó una acidez titulable por debajo de lo reportado por los mismos autores.

Así, la acidez titulable en tuna concuerda con la acidez de distintos tipos de frutas, como cereza, toronja, pera, jitomate, entre otras (**Nielsen, 2017**).

6.1.3.4. Azúcares reductores

Por otro lado, en cuanto al contenido de azúcares reductores en las muestras evaluadas, se determinó diferencia significativa ($p < 0.0001$) en la mayoría de las muestras. Así, las tunas Cristalina y Cardona fueron aquellas con menor contenido de azúcares reductores (5.813 – 6.129 g/100 g), mientras que la variedad Amarilla Montesa aquella con el mayor contenido de azúcares reductores (10.531 g/100 g). Asimismo, las muestras Reyna (1 y 2) presentaron diferencia significativa ($p < 0.0001$) entre sí, mostrando la Reyna 2 un contenido superior de azúcares reductores a comparación con el fruto menos maduro, teniendo 1.296 veces más azúcares reductores que la Reyna 1. A su vez, esto se encuentra relacionado con

la acidez de los frutos, en donde cuanto mayor el estado de maduración, menor la acidez y mayor contenido de azúcares reductores (traduciéndose a dulzor por la naturaleza química de los carbohidratos). También, se observó que no todos los sólidos solubles correspondieron a los azúcares reductores, siendo estos últimos, en algunos casos, la mitad del contenido de sólidos solubles. Con esto, se puede esperar que el resto de los sólidos solubles corresponda a otros componentes hidrosolubles, como son vitaminas, minerales, ciertas proteínas, e incluso oligo- y polisacáridos. A pesar de esto, se observó que, de manera general, las tunas provenientes del Valle de Teotihuacán presentaron un contenido promedio de azúcares reductores (8.076 g/100 g) ligeramente mayor a aquellas variedades originarias del Altiplano Mexicano (7.514 g/100 g), donde se puede suponer que un clima ligeramente más templado, así como una mayor altitud pudo provocar una mayor producción de estos azúcares a lo largo del desarrollo fisiológico de estos frutos, aunque hay que tomar en consideración la sequía que se dio en el norte del país a lo largo del 2022. Asimismo, las variedades Reyna (1 y 2) presentaron un contenido similar a lo reportado por **Delgado & Pimienta-Barrios (1994: citados por Pimienta-Barrios, 1994)**, siendo 0.904 y 1.172 veces lo reportado por los mismos autores, respectivamente. También, las variedades Roja Pelona, “Naranjona” y Cardona presentaron valores por debajo de lo reportado por estos autores. De acuerdo con **Moßhammer et al. (2006)**, el contenido de azúcares totales en tunas generalmente se encuentra en un rango de 10 – 13 g/100 g. Sin embargo, en este estudio se determinaron contenidos menores (5.813 g/100 g) al rango anteriormente mencionado. Esto se puede deber tanto a la temporalidad que se dio en 2022, como a la variedad y cultivar en particular de las tunas evaluadas. Por otro lado, las variedades Cardona, Charola, Roja Pelona, Pico Chulo y Amarilla Montesa presentaron valores menores con respecto a lo reportado por **Zenteno-Ramírez et al. (2015)** en las mismas variedades. Dado que en el estudio realizado por **Zenteno-Ramírez et al. (2015)** se realizó en frutos originarios del Altiplano Mexicano (a excepción de la Pico Chulo, proveniente del Valle de Teotihuacán), específicamente de SLP, esta diferencia se pudo deber a la sequía anteriormente mencionada.

Asimismo, como se puede ver en el **Anexo 1**, se determinó que la variedad Amarilla Montesa presentó, de manera significativa ($p < 0.0001$), el contenido de azúcares más alto

que el resto de las variedades analizadas (57.360 g/100 g_{bs}), al igual que en base húmeda; seguida de esta se encontró la Reyna 2, presentando un contenido de azúcares reductores significativamente mayor ($p < 0.0001$) al resto de variedades, incluyendo la Reyna 1. Así, se puede ver que cuando el fruto se encuentra en una madurez hortícola, el contenido de azúcares reductores se encontrará notablemente más alto que en un fruto que aún no alcanza esta madurez (Reyna 1). También, las variedades que presentaron el menor contenido de azúcares reductores en su pulpa fueron la Cristalina y Cardona con 28.850 – 29.820 g/100 g_{bs}. Por otro lado, las variedades de tuna provenientes del Valle de Teotihuacán presentaron, en promedio (41.760 g/100 g_{bs}), un contenido en base seca ligeramente mayor de azúcares reductores a comparación de las variedades de tuna originarias del Altiplano Mexicano (38.635 g/100 g_{bs}). De esta forma, se pudo observar que todas las variedades de tuna evaluadas en el presente estudio presentaron un contenido de azúcares reductores menor con respecto a lo mencionado por **Lamghari et al. (1998)** para tuna francesa (*O. sp.*: 64.6 %_{bs}).

6.1.3.5. Vitamina C

En el contenido de vitamina C en tuna se encontró que las variedades Roja Pelona, Charola, Cardona, Roja San Martín, “Naranjona” y Reyna 2 presentaron el menor contenido de este nutrimento, siendo menores a 3.000 mg EAA/100 g con diferencia significativa ($p < 0.0001$) al resto de las variedades de tuna, tratándose de variedades fenotípicamente rojas en su mayoría. Por otro lado, la variedad que presentó el mayor contenido de vitamina C fue la Pico Chulo con 23.500 mg EAA/100 g, seguida de la Amarillo Plátano, Cristalina, Amarilla Montesa y Reyna 1. Asimismo, se pudo observar que, al tratarse de un fruto en estado de maduración mayor (óptimo, Reyna 2), el contenido de esta vitamina se redujo considerablemente, siendo 0.234 veces menor que en un fruto aún en desarrollo fisiológico (Reyna 1). Aunque algo importante a notar es que este cambio puede ser un rasgo particular de esta variedad de tuna. De manera general, las tunas originarias del Altiplano Mexicano mostraron un contenido promedio de vitamina C (5.270 mg EAA/100 g) menor a los frutos provenientes del Valle de Teotihuacán (10.443 mg EAA/100 g). También, **Delgado & Pimienta-Barrios (1994: citados por Pimienta-Barrios, 1994)** reportaron que el contenido de vitamina C en las variedades Alfajayucan, Rojo Pelón, Naranjona y Cardón entre 9 – 31 mg EAA/100 g,

encontrándose todas estas variedades por encima de lo determinado en las mismas variedades. La variedad Reyna 1 presentó valores más elevados que Reyna 2, siendo esto esperado ya que un fruto en mayor estado de maduración tiene menor contenido de ácido ascórbico. Por otro lado, se observó que las variedades verdes y amarillo-anaranjadas presentaron un contenido considerablemente menor a lo reportado por **Medina et al. (2007)** para variedades de estas características fenotípicas, donde la variedad Roja San Martín (1.124 mg EAA/100 g) también presentó un contenido de vitamina C muy por debajo de lo reportado por el mismo autor (17.2 mg EAA/100 g), a excepción de la variedad Pico Chulo, como se mencionó anteriormente. Asimismo, las variedades Cristalina, Amarilla Montesa y Pico Chulo presentaron 1.644 veces, 1.342 veces y 2.045 veces más contenido de vitamina C, respectivamente, que lo reportado por **Figueroa-Cates et al. (2010)** en las mismas variedades, ya sea por las regiones de cultivo [siendo originarias de Zacatecas aquellos frutos evaluados por **Figueroa-Cates et al. (2010)**], como por la sequía presentada en el norte del país a lo largo del 2022. Adicionalmente, la variedad Amarillo Plátano presentó un contenido de vitamina C 0.627 veces menor al reportado por **Ramírez-Ramos et al. (2015)** para la misma variedad (aunque proveniente de Jalisco, México). De esta manera, como mencionan **Stintzing et al. (2001)**, la tuna es una buena fuente de vitamina C.

Así, el contenido de vitamina C en tuna concuerda con el contenido de esta vitamina en distintas frutas, como la manzana, chabacano, nashi, plátano, zarzamora, mora azul, carambola, limón, mango, entre muchas otras, de acuerdo con lo publicado por **Gebhardt & Thomas (2002)**.

Tabla 9. Parámetros físicoquímicos en pulpa de variedades de tuna (*Opuntia* spp.) del Altiplano Mexicano y del Valle de Teotihuacán.

Origen	Variedad	Sólidos Solubles (°Bx)	pH	Acidez Titulable (% ác. cít.)	Azúcares Reductores (g/100 g)	Vitamina C (mg EAA/100 g)
	Cristalina	13.0 ± 0.7 bcde	5.90 ± 0.01 f	0.077 ± 0.000 c	5.813 ± 0.410 a	13.518 ± 0.194 f
	Amarilla Montesa	11.9 ± 1.5 abc	5.59 ± 0.01 c	0.224 ± 0.011 h	10.531 ± 0.546 h	12.545 ± 0.430 e
	Amarilla Venado	13.9 ± 1.1 de	6.59 ± 0.09 j	0.034 ± 0.002 a	8.352 ± 0.259 f	5.934 ± 0.371 c
SLP	Cardona	11.2 ± 2.5 a	5.11 ± 0.01 b	0.399 ± 0.009 j	6.129 ± 0.254 a	1.124 ± 0.000 a
	Roja Pelona	12.6 ± 1.7 abcd	5.75 ± 0.01 d	0.153 ± 0.007 f	7.662 ± 0.178 e	0.562 ± 0.000 a
	“Naranjona”	13.9 ± 1.9 de	4.60 ± 0.01 a	0.493 ± 0.015 k	6.858 ± 0.066 bc	1.996 ± 0.346 b
	Charola	11.7 ± 2.6 abc	5.52 ± 0.02 c	0.113 ± 0.006 e	6.590 ± 0.080 b	0.852 ± 0.295 a
	Reyna 1	13.4 ± 1.1 de	5.83 ± 0.06 e	0.176 ± 0.011 g	7.234 ± 0.068 cd	10.238 ± 0.488 d
	Reyna 2	15.4 ± 1.1 f	6.50 ± 0.04 i	0.034 ± 0.000 a	9.379 ± 0.189 g	2.395 ± 0.000 b
Edomex	Pico Chulo	12.7 ± 1.3 bcde	6.49 ± 0.09 i	0.315 ± 0.014 i	8.573 ± 0.082 f	23.500 ± 0.781 h
	Roja San Martín	14.0 ± 1.6 ef	6.19 ± 0.03 g	0.079 ± 0.000 cd	7.718 ± 0.246 e	1.124 ± 0.000 a
	Amarillo Plátano	11.6 ± 1.6 ab	6.23 ± 0.04 g	0.091 ± 0.001 d	7.475 ± 0.035 de	14.957 ± 0.000 g
Tamps.	Amarilla Miquihuana	13.1 ± 1.3 cde	6.36 ± 0.03 h	0.055 ± 0.000 b	8.179 ± 0.076 f	5.625 ± 0.348 c

* Los resultados son valores promedio de 10 réplicas para sólidos solubles y 3 réplicas para pH, acidez titulable, azúcares reductores y vitamina C, por cada muestra evaluada.

** Distintas letras indican diferencia estadísticamente significativa entre las muestras, $\alpha = 0.05$ ($p < 0.05$).

6.2. Pigmentos, polifenoles y capacidad antioxidante

6.2.1. Pigmentos

6.2.1.1. Betalaínas

6.2.1.1.1. Betaxantinas

En cuanto al contenido de betaxantinas (amarillas) en pulpa de tuna (**Tabla 10**), se encontró diferencia significativa ($p < 0.0001$) entre absolutamente todas las variedades de tuna, encontrándose variedades rojas-naranjas como la Charola, Cardona, Amarilla Miquihuana y Roja San Martín las variedades con mayor contenido de betaxantinas en pulpa, con 0.0777, 0.0687, 0.0570 y 0.0550 mg EI/g, respectivamente. Asimismo, se determinó que las variedades de tuna de tonalidades verde-blancas contienen bajo contenido de este pigmento. Como se puede ver en la **Tabla 10**, la variedad Reyna 1 presentó un contenido de indicaxantina de 0.0020 mg EI/g, mientras que en la Reyna 2 no se detectó la presencia de este pigmento. Con esto, se puede considerar la reducción en la presencia de este pigmento en esta variedad de tuna conforme madura el fruto, perdiendo esta tonalidad amarilla, y aumentando, a su vez, la presencia de otro pigmento o la ausencia de estos. También, se encontró concordancia en lo determinado en la variedad Cardona (0.0687 mg EI/g) con lo reportado por **Chavez-Santoscoy et al. (2009)** en la misma variedad, presentando un contenido de betaxantinas de 0.0663 mg EI/g. Adicionalmente, se determinó que la variedad Amarillo Plátano presentó un contenido de betaxantinas 4.830 veces menor a lo reportado por **Ramírez-Ramos et al. (2015)** en la madurez hortícola de la misma variedad, pudiéndose deber a diversos factores, como la zona de cultivo, las condiciones climáticas que se dieron durante el desarrollo de los frutos, entre otros.

Por otro lado, en cuanto al contenido de betaxantinas en el jugo de tuna (**Tabla 10**), se determinó diferencia significativa ($p < 0.0001$) entre la mayoría de las distintas variedades de tuna. Las variedades Charola y Amarilla Miquihuana fueron semejantes ($p > 0.05$) en el contenido de indicaxantina en su jugo, siendo además las variedades con mayor contenido, significativamente hablando ($p < 0.0001$), de este pigmento con 134.590 y 133.826 mg EI/L, respectivamente. Asimismo, se determinó similitud ($p > 0.05$) entre las variedades Amarilla

Venado y Amarillo Plátano, presentando un contenido bajo (a comparación de la mayoría de variedades) de este pigmento con 31.923 y 31.142 mg EI/L, respectivamente. Por otro lado, también se determinó que las variedades rojo-anaranjadas de tuna presentaron contenidos elevados de estos pigmentos, como las variedades Charola, Amarilla Miquihuana, Roja Pelona, Pico Chulo, entre otras. Sin embargo, se encontró que la variedad Reyna 1 presentó un contenido elevado (128.009 mg EI/L) de estos pigmentos amarillos, siendo significativamente ($p < 0.0001$) superior a lo encontrado en la Reyna 2 (7.024 mg EI/L). Asimismo, con esto último en cuestión, las variedades de tonalidades verde-blancas (Reyna 2 y Cristalina) mostraron un bajo contenido de estos pigmentos, pero no nulos, en jugo de tuna, siendo significativamente menores ($p < 0.0001$) al resto de variedades de tuna evaluadas. Adicionalmente, se encontraron diferencias en lo determinado en las variedades Cristalina (0.832 mg EI/L), Amarilla Montesa (58.884 mg EI/L) y Pico Chulo (70.075 mg EI/L) con lo reportado por **Figeroa-Cates *et al.* (2010)** en las mismas variedades presentando un contenido de betaxantinas (expresadas como indicaxantina) de 9.81, 43.93 y 49.40 mg EI/L, respectivamente. También, **Sumaya-Martínez *et al.* (2011)** reportaron betaxantinas en las variedades San Martín (~ 50 mg EI/L), Picochulo (~ 40 mg EI/L), Reina (~ 8 mg EI/L) y Cristalina (~ 10 mg EI/L). Así, en comparación con lo determinado en el presente estudio, estas variedades presentaron un contenido de betaxantinas aproximadamente 1.344 veces mayor, 1.752 veces mayor, 16.001 veces mayor con Reyna 1 (1.139 veces menor con Reyna 2), y 12.019 veces menor, respectivamente, con lo reportado por los mismos autores.

6.2.1.1.2. Betacianinas

En cuanto al contenido de betacianinas (rojo-violeta) en pulpa de tuna (**Tabla 10**), se encontró diferencia significativa ($p < 0.0001$) entre la mayoría de las variedades de tuna, encontrándose variedades rojas-naranjas como la Charola, Cardona y Roja San Martín las variedades con mayor contenido de betacianinas en pulpa, con 0.1769, 0.1422 y 0.1344 mg EB/g pulpa, respectivamente. Asimismo, se determinó que las variedades de tonalidades verde-blancas fueron las de menor presencia de este pigmento. De forma similar, se encontró que las variedades Amarilla Plátano, Amarilla Montesa y “Naranjona” presentaron un contenido

de betacianinas semejante entre sí ($p > 0.05$), tratándose estas de variedades amarillo-anaranjadas. Asimismo, como se puede observar en la **Tabla 10**, la variedad Reyna 1 presentó un contenido betanina de 0.0010 mg EB/g pulpa, mientras que en la Reyna 2 no se detectó la presencia de este pigmento. Con esto, puede considerarse que, aunque se sintetiza en baja cantidad este pigmento, conforme madura pierde/se diluye esta pequeña cantidad en la pulpa, llegando a perder dichas tonalidades rojo-violetas. También, se encontró concordancia en lo determinado en la variedad Cardona (0.1422 mg EI/g) con lo reportado por **Chavez-Santoscoy et al. (2009)** en la misma variedad, presentando un contenido de betacianinas de 0.1128 mg EI/g, siendo este último ligeramente menor (provocando tonalidades de rojo-violeta más intensas). Adicionalmente, se determinó que la variedad Amarillo Plátano presentó un contenido de betacianinas 7.382 veces menor a lo reportado por **Ramírez-Ramos et al. (2015)** en la madurez hortícola de la misma variedad, pudiéndose deber a diversos factores (así como en el contenido de betaxantinas).

Por otro lado, en cuanto al contenido de betacianinas en el jugo de tuna (**Tabla 10**), se determinó diferencia significativa ($p < 0.0001$) entre la mayoría de las distintas variedades de tuna. Las variedades Charola y Roja San Martín fueron aquellas con mayor contenido de betacianinas en su jugo con 321.322 y 177.894 mg EB/L, respectivamente, presentando diferencia significativa ($p < 0.0001$) tanto entre sí, como entre el resto de las variedades evaluadas. Asimismo, se determinó similitud ($p > 0.05$) entre las variedades Amarillo Plátano y Reyna 2, presentando un contenido bajo (a comparación de la mayoría de las otras variedades) de este pigmento con 7.624 y 6.863 mg EB/L, respectivamente. Por otro lado, también se determinó que las variedades de tuna rojo-anaranjadas, de forma general, presentaron contenidos elevados de estos pigmentos. Se encontró que la variedad Reyna 1 presentó un contenido elevado (85.443 mg EB/L) de estos pigmentos rojo-violetas, siendo significativamente ($p < 0.0001$) superior a lo encontrado en la Reyna 2 (6.863 mg EB/L). Sin embargo, la variedad Reyna 2, aunque presentó un contenido bajo de este pigmento, fue significativamente mayor ($p < 0.0001$) al determinado en la variedad Cristalina (0.795 mg EB/L), siendo esta última aquella con menor contenido de este pigmento en su pulpa. Adicionalmente, se en-

contraron diferencias en lo determinado en las variedades Cristalina (0.795 mg EB/L), Amarilla Montesa (3.538 mg EB/L) y Pico Chulo (24.567 mg EB/L) con lo reportado por **Figuerroa-Cates et al. (2010)** en las mismas variedades presentando un contenido de betaxantinas (expresadas como indicaxantina) de 10.16, 16.02 y 81.37 mg EB/L, respectivamente. También, **Sumaya-Martínez et al. (2011)** reportaron betaxantinas en las variedades San Martín (~ 125 mg EB/L), Picochulo (~ 15 mg EB/L), Reina (~ 5 mg EB/L) y Cristalina (~ 10 mg EB/L). Así, en comparación con lo determinado en el presente estudio, estas variedades presentaron un contenido de betaxantinas aproximadamente 1.423 veces mayor, 1.638 veces mayor, 17.089 veces mayor con Reyna 1 (1.373 veces menor con Reyna 2), y 12.579 veces menor, respectivamente, con lo reportado por los mismos autores. Asimismo, la variedad Roja San Martín presentó un contenido de betacianinas 1.454 veces mayor con respecto a lo reportado por **Alba (2013)** en el control.

6.2.1.2. Clorofila

En cuanto al contenido de clorofila (total) en las variedades de tuna (**Tabla 10**), se determinó que variedades de tuna roja, la Roja Pelona y la Roja San Martín fueron aquellas con el mayor contenido ($p < 0.0001$) de clorofila en pulpa con 9.334 y 5.500 mg clorofila/100 g, respectivamente. Sin embargo, se encontró que las variedades Cristalina y Reyna 1 fueron semejantes ($p > 0.05$), presentando un contenido mínimo de este pigmento con 0.280 y 0.785 mg clorofila/100 g, respectivamente. Asimismo, se observó que, en un fruto con mayor madurez, se redujo la presencia de este pigmento, donde probablemente la ausencia de pigmentos puede permitir la reflexión de luz y provocar una tonalidad blanca. Por otro lado, se observó que, de manera general, variedades amarillo-anaranjadas presentaron ausencia de este pigmento en pulpa, o bien, un contenido tan bajo que no fue detectable a través de la metodología realizada., como fueron las variedades Amarilla Montesa, Amarilla Venado, “Naranja”, Pico Chulo y Charola. Adicionalmente, se determinó que la variedad Cristalina, presentó un contenido menor, mientras que la Amarilla Montesa y Pico Chulo tuvieron un contenido mayor de clorofila total que lo reportado por **Figuerroa-Cates et al. (2010)**. De acuerdo con **Martín del Campo et al. (2019)**, el contenido de clorofila en la variedad Burrón (*O. albicarpa*), se encontró entre 0.4092 – 1.0878 mg clorofila/100 g pulpa, entre 99 y 132 días

después de la floración. Este contenido de clorofila coincide con lo encontrado en el presente estudio en las variedades Cardona (0.459 mg clorofila/100 g) y Reyna 1 (0.785 mg clorofila/100 g), en donde la mayoría de las tunas evaluadas mostraron un contenido por debajo a lo reportado por los mismos autores.

6.2.1.3. Carotenos

Así, el contenido de carotenos (amarillo-anaranjados) cuantificado en las variedades de tuna (**Tabla 10**) se encontró en mayor medida en la variedad Amarilla Miquihuana con diferencia significativa ($p < 0.0001$) con respecto al resto de variedades. De esta manera, variedades amarillo-anaranjadas (pese algunas rojas) presentaron un contenido de 8.117 – 17.472 mg carotenos/100 g. Por otro lado, las variedades Reyna (1 y 2) y Cristalina, en concordancia con sus tonalidades en pulpa, así como en lo encontrado en otros pigmentos, presentaron un contenido mínimo, menores ($p < 0.0001$) al resto de variedades evaluadas. Sin embargo, se observó que en un fruto con mayor madurez (Reyna 2), menor la presencia de carotenos, en concordancia con lo mencionado anteriormente en otros pigmentos. Adicionalmente, se encontró que la variedad Cristalina presentó un contenido menor y la Amarilla Montesa y Pico Chulo presentaron un contenido mayor a lo reportado por **Figuroa-Cates *et al.* (2010)**.

Tabla 10. Pigmentos (betalaínas, clorofila y carotenos) en pulpa de variedades de tuna (*Opuntia* spp.) del Altiplano Mexicano y del Valle de Teotihuacán.

Origen	Variedad	Betaxantinas		Betacianinas		Clorofila Total (mg clorofila/100 g)	Carotenos (mg carotenos/100 g)
		mg EI/g	mg EI/L	mg EB/g	mg EB/L		
	Cristalina	0.0010 ± 0.0000 b	0.832 ± 0.013 a	0.0005 ± 0.0000 b	0.795 ± 0.014 a	0.280 ± 0.013 bc	0.383 ± 0.011 b
	Amarilla Montesa	0.0271 ± 0.0003 h	58.884 ± 0.074 f	0.0032 ± 0.0002 d	3.538 ± 0.024 c	ND a	16.259 ± 0.068 j
	Amarilla Venado	0.0123 ± 0.0001 d	31.923 ± 0.064 d	0.0018 ± 0.0001 c	2.130 ± 0.028 b	ND a	11.652 ± 0.023 f
SLP	Cardona	0.0687 ± 0.0006 l	45.379 ± 0.051 e	0.1422 ± 0.0002 i	75.656 ± 0.265 h	0.459 ± 0.020 d	14.456 ± 0.041 i
	Roja Pelona	0.0218 ± 0.0000 g	73.471 ± 0.578 i	0.0284 ± 0.0003 g	80.147 ± 0.106 i	9.334 ± 0.203 g	14.033 ± 0.110 h
	“ Naranjona”	0.0318 ± 0.0001 i	27.656 ± 0.333 c	0.0029 ± 0.0001 d	5.430 ± 0.058 d	ND a	13.239 ± 0.032 g
	Charola	0.0777 ± 0.0006 m	134.590 ± 0.161 k	0.1769 ± 0.0007 j	321.322 ± 1.388 l	ND a	4.203 ± 0.104 d
	Reyna 1	0.0020 ± 0.0000 c	128.009 ± 4.588 j	0.0012 ± 0.0001 c	85.443 ± 0.608 j	0.785 ± 0.022 e	2.971 ± 0.018 c
	Reyna 2	ND a	7.024 ± 0.038 b	ND a	6.863 ± 0.090 e	0.116 ± 0.056 ab	0.034 ± 0.010 a
Edomex	Pico Chulo	0.0206 ± 0.0001 f	70.075 ± 0.123 h	0.0051 ± 0.0001 e	24.567 ± 0.053 f	ND a	16.083 ± 0.119 j
	Roja San Martín	0.0550 ± 0.0000 j	67.215 ± 0.868 g	0.1344 ± 0.0010 h	177.894 ± 0.280 k	5.500 ± 0.293 f	14.114 ± 0.249 h
	Amarillo Plátano	0.0176 ± 0.0001 e	31.142 ± 0.257 d	0.0034 ± 0.0002 d	7.624 ± 0.134 e	0.045 ± 0.030 a	8.117 ± 0.130 e
Tamps.	Amarilla Miquihuana	0.0570 ± 0.0000 k	133.826 ± 0.855 k	0.0061 ± 0.0000 f	31.645 ± 0.431 g	0.292 ± 0.017 cd	17.472 ± 0.318 k

* Los resultados son valores promedio de 3 réplicas por cada muestra evaluada.

** Distintas letras indican diferencia estadísticamente significativa entre las muestras, $\alpha = 0.05$ ($p < 0.05$).

*** ND: No Detectable.

6.2.2. Polifenoles y capacidad antioxidante

6.2.2.1. Flavonoides

En la **Tabla 11** se pueden observar las diferencias significativas ($p < 0.0001$) presentadas en el contenido de flavonoides de las distintas variedades de tuna, en donde la variedad Cardona presentó el contenido más alto de estos pigmentos en su pulpa con 2.2166 mg EQ/100 g. Asimismo, de manera general las variedades fenotípicamente rojas presentaron un alto contenido de flavonoides con respecto al resto de variedades de tuna. Sin embargo, se determinó que la tuna Cristalina también presentó un contenido de 1.9451 mg EQ/100 g de estos pigmentos en su pulpa. Por otro lado, la variedad Reyna (1 y 2) presentó un contenido de flavonoides bajo ($p < 0.0001$), siendo estas dos tunas Reyna (1 y 2) semejantes ($p > 0.05$) entre sí. También, se encontró que la variedad Amarillo Plátano fue aquella con el menor contenido de flavonoides en su pulpa con 0.6969 mg EQ/100 g. Se determinó cierta diferencia en lo encontrado en la tuna Cardona (2.2166 mg EQ/100 g), siendo 14.450 veces menor con respecto a lo reportado por **Chavez-Santoscoy et al. (2009)** en la misma variedad. Asimismo, **Ramírez-Ramos et al. (2015)** reportaron, para la variedad Plátano en su madurez hortícola, un contenido de flavonoides de 6.00 mg EQ/100 g, siendo este 8.610 veces mayor a lo encontrado en la variedad Amarillo Plátano en el presente estudio. De manera general, se determinó un contenido de flavonoides en las variedades de tuna de 0.6969 – 2.2166 mg EQ/100 g, siendo este rango bajo de acuerdo con lo reportado por **Bouzoubaâ et al. (2016)** en tuna amarilla marroquí, así como en tuna chihuahuense (**Valero-Galván et al., 2021**), sin embargo, se encontró considerablemente mayor a lo reportado por **Gómez-Maqueo et al. (2020)** en tuna de las Islas Canarias.

6.2.2.2. Fenoles Totales

En la **Tabla 11** se pueden observar las diferencias significativas ($p < 0.0001$) presentadas en el contenido de fenoles totales de las distintas variedades de tuna, en donde la variedad Cardona, presentó el contenido más alto de estos compuestos en su pulpa con 140.5939 mg EAG/100 g. A diferencia del contenido de flavonoides, los compuestos fenólicos totales (fe-

noles totales) se encontró también en altos contenidos en algunas variedades amarillo-anaranjadas y en algunas de las variedades fenotípicamente rojas. Sin embargo, se observó que, de manera general, las variedades verde-blancas presentaron un contenido bajo de estos compuestos, encontrándose estas en un rango de 22.7537 – 51.8875 mg EAG/100 g. Así, también se encontró que la variedad Charola fue aquella que presentó el menor contenido de fenoles totales ($p < 0.0001$) de todas las variedades evaluadas. Se determinó cierta diferencia en lo encontrado en la tuna Cardona (140.5939 mg EAG/100 g), siendo 1.390 veces menor con respecto a lo reportado por **Chavez-Santoscoy et al. (2009)** en la misma variedad. Adicionalmente, se observó que, de acuerdo con lo mencionado por **Dasgupta & Klein (2014)**, la mayoría de las variedades de tuna evaluadas en el presente estudio presentaron un contenido de fenoles totales bajo en comparación con moras (zarzamora, mora azul, aronia, arándano, frambuesa y fresa), siendo estas de las frutas con mayor contenido de compuestos fenólicos en la naturaleza. La única variedad de tuna que presentó cierta similitud con el arándano y la frambuesa fue la Cardona (140.59.9 mg EAG/100 g). Asimismo, **Ramírez-Ramos et al. (2015)** reportaron, para la variedad Plátano en su madurez hortícola, un contenido de fenoles totales de 113.22 mg EAG/100 g, siendo este 1.751 veces mayor a lo encontrado en la variedad Amarillo Plátano en el presente estudio. De manera general, se determinó un contenido de fenoles totales en las variedades de tuna de 15.9843 – 140.5939 mg EAG/100 g, encontrándose este rango en concordancia con lo reportado por Bouzoubaâ *et al.* (2016) en tuna amarilla marroquí y en lo reportado por **Gómez-Maqueo et al. (2020)** en tuna de las Islas Canarias, pero no en tuna chihuahuense (**Valero-Galván et al., 2021**), siendo estas últimas más ricas en compuestos fenólicos totales. De esta manera, se observó que el contenido de fenoles totales en pulpa determinado en todas las variedades de tuna fue mayor al contenido de flavonoides, por lo que, como menciona **Cui et al. (2006: citados por Ramírez-Ramos et al., 2015)**, esto se podría deber a que cierta presencia de los flavonoides se encuentre en su forma de procianidinas (oligómeros de taninos condensados), así como se ha observado en otros frutos.

6.2.2.3. Capacidad antioxidante

Las frutas contienen compuestos nutritivos y, de manera general, bioactivos, como son los compuestos fenólicos, vitaminas, minerales, e incluso pigmentos como antocianinas y carotenoides (Fawole & Opara, 2013). Con esto, el poder o capacidad antioxidante que exhiban estos frutos dependerá del contenido de todos estos compuestos, trabajando en conjunto para la eliminación de los radicales (Zang *et al.*, 2017), siendo la vitamina C, vitamina E, carotenoides y flavonoides los principales responsables de esta actividad, así como otros polifenoles (Müller *et al.*, 2010). En cuanto a la capacidad antioxidante equivalente de ácido ascórbico de las variedades de tuna (Tabla 11), se encontró que las tunas Cardona, Roja Pelona, “Naranjona” y Charola presentaron en mayor medida ($p < 0.0001$) esta actividad antirradicalaria con 69.678 – 75.255 mg EAA/100 g. Así, al igual que Araya *et al.* (2006), de manera general se observó que los frutos con mayor pigmentación (particularmente roja) tuvieron mayor capacidad antioxidante. Por otro lado, los dos frutos Reyna (1 y 2) presentaron una capacidad antioxidante semejante ($p > 0.05$) con valores entre 42.463 – 47.203 mg EAA/100 g, siendo, a su vez, las de menor capacidad antioxidante ($p < 0.0001$) en comparación con el resto de variedades. También, se pudo observar que, de manera general, las tunas provenientes del Valle de Teotihuacán presentaron, en promedio (55.310 mg EAA/100 g), una capacidad antioxidante menor que aquellas originarias del Altiplano Mexicano (64.612 mg EAA/100 g). Así, a mayor pigmentación, mayor capacidad antioxidante.

En comparación con otros frutos y con lo reportado por Floegel *et al.* (2011), se encontró que la tuna presentó una capacidad antioxidante similar a frutas como la nectarina, aguacate, melón cantalupo, durazno, toronja, mango, pera y arándano, así como similar a otros vegetales como la patata, lechuga, jitomate, frijoles, repollo verde, espinaca y pimiento morrón. No obstante, la tuna mostró una capacidad antioxidante menor que otras frutas como la manzana, plátano, mora azul, cereza dulce, uva roja, limón, ciruela y fresa, así como de otros vegetales como el brócoli, col morada y pimiento picante. Asimismo, la tuna (de manera general) presentó una capacidad antioxidante “media” de acuerdo con lo mencionado por Zang *et al.* (2017), presentando una capacidad antioxidante mayor que frutos como el plátano, pitahaya roja y blanca, chicozapote, pera blanca china y el níspero japonés (< 30 mg EAA/100 g).

Incluso se observó que la tuna presenta la misma capacidad antioxidante de algunas frutas como la naranja, toronja, mango, kiwi verde, limón, papaya, piña y el mangostán (30 – 90 mg EAA/100 g). Sin embargo, la tuna mostró una menor capacidad antioxidante que frutos como la ciruela verde y negra, kiwi amarillo, uva morada y la fresa (> 90 mg EAA/100 g), y más aún por debajo de la mora morus, fruto con capacidad antioxidante “extremadamente alto” (> 300 mg EAA/100 g) (Kim *et al.*, 2003; Zang *et al.*, 2017). Así, la tuna mostró una capacidad antioxidante media, dependiendo a su vez de la variedad de este fruto, así como de la región de cultivo, siendo aquellas de clima más cálido (Altiplano Mexicano) las que presentan en mayor grado esta propiedad.

Por otro lado, se observó que algunas de las variedades evaluadas en el presente estudio presentaron una capacidad antioxidante en base seca (**Anexo 5**) similares a hierbas de té negro como el de cinco rosas, de Pitco, así como algunos té oolong (azules o semifermentados) como el “Eve’s oolong tea”. También de té verdes, como el “Eve’s green tea”, y té verde y de limón holotrópico, de acuerdo con lo reportado por du Toit *et al.* (2001). Con esto, se puede ver que la capacidad antioxidante de la tuna puede ser tan alta como ciertos té, frutas y vegetales (anteriormente mencionadas) que se pueden asociar a sus diversas propiedades benéficas, siendo algunas de estas producidas por los compuestos que les confieren esta capacidad antioxidante.

Tabla 11. Polifenoles y capacidad antioxidante en pulpa de variedades de tuna (*Opuntia* spp.) del Altiplano Mexicano y del Valle de Teotihuacán.

Origen	Variedad	Flavonoides (mg EQ/100 g)	Fenoles Totales (mg EAG/100 g)	Capacidad Antioxidante (mg EAA/100 g)
SLP	Cristalina	1.9451 ± 0.1753 f	41.5942 ± 1.0255 c	54.522 ± 4.178 cd
	Amarilla Montesa	1.2329 ± 0.1137 de	49.3346 ± 1.5878 de	52.695 ± 4.240 bc
	Amarilla Venado	1.3050 ± 0.0377 de	52.3692 ± 2.4090 ef	59.007 ± 1.546 d
	Cardona	2.2166 ± 0.2015 g	140.5939 ± 5.2377 j	69.678 ± 3.753 efg
	Roja Pelona	1.8730 ± 0.1385 f	62.9674 ± 2.4326 h	73.210 ± 2.533 fg
	"Naranjona"	1.2615 ± 0.2048 de	81.2920 ± 2.5389 i	74.039 ± 3.354 g
	Charola	1.4360 ± 0.2614 e	15.9843 ± 0.5745 a	75.255 ± 2.048 g
Edomex	Reyna 1	0.9732 ± 0.0641 bc	22.7537 ± 1.7929 b	47.203 ± 2.209 ab
	Reyna 2	0.8109 ± 0.0380 ab	51.8875 ± 1.9190 ef	42.463 ± 3.647 a
	Pico Chulo	1.4072 ± 0.0367 de	54.4265 ± 0.9519 f	65.656 ± 4.943 e
	Roja San Martín	1.7501 ± 0.0949 f	59.0227 ± 1.9372 g	67.364 ± 6.798 ef
	Amarillo Plátano	0.6969 ± 0.0671 a	64.6643 ± 0.6317 h	53.836 ± 1.501 cd
Tamps.	Amarilla Miquihuana	1.1851 ± 0.0249 cd	46.3086 ± 0.9694 d	58.492 ± 3.170 cd

* Los resultados son valores promedio de 3 réplicas por cada muestra evaluada.

** Distintas letras indican diferencia estadísticamente significativa entre las muestras, $\alpha = 0.05$ ($p < 0.05$).

6.3. Dimensiones y peso

6.3.1. Dimensiones

6.3.1.1. Fruto entero

Como se puede observar en la **Tabla 12**, las variedades Amarillo Plátano, Amarilla Michihuana y Reyna 2 presentaron los valores más altos ($p < 0.0001$) de diámetro polar en el fruto entero, siendo las tunas más “largas” con respecto al resto de variedades. Asimismo, se encontró que la variedad Cardona fue la más tuna con menor diámetro polar, siendo la tuna más pequeña ($p < 0.0001$). Por otro lado, se vio reflejado en el tamaño del fruto que mientras se encuentre aún en desarrollo fisiológico, previo a su madurez hortícola (Reyna 1), el fruto es más pequeño, mientras que un fruto que ya haya alcanzado esta madurez hortícola (Reyna 2) será significativamente más “largo”. También, como se puede ver en la **Tabla 12**, las tunas provenientes del Valle de Teotihuacán presentaron, en promedio (8.896 cm), un eje polar considerablemente mayor con respecto a variedades provenientes del Altiplano Mexicano (7.647 cm). Con esto se podría considerar que un clima ligeramente más templado, así como el factor importante de la precipitación pluvial impactan notablemente el tamaño de los frutos. En comparación de las variedades evaluadas con lo encontrado por **Dehbi et al. (2014)**, en donde reportaron una longitud de los frutos marroquines (eje polar) entre 6.70 – 8.00 cm, aproximadamente, donde sólo algunas de las variedades evaluadas en el presente estudio coincidieron en este parámetro, siendo estas la Roja Pelona, “Naranjona”, Reyna 1; de esa manera, también se encontró similitud en la longitud de estos frutos con lo reportado por **Bariza et al. (2017)** en tuna argelina. Se encontró concordancia en lo determinado en la Reyna 1 (**Anexo 4**) con lo reportado por **Paucara (2017)** en tuna blanca boliviana, así como las variedades Pico Chulo, Amarilla Venado y Amarilla Montesa con lo reportado en tuna naranja por el mismo autor y, de forma similar, la variedad Roja Pelona con lo reportado por **Paucara (2017)** en tuna roja, siendo estas tunas bolivianas y las ya mencionadas, evaluadas en el presente estudio, de un largo similar. Por otro lado, **Martín del Campo et al. (2019)** determinaron que en variedad Burróna, el diámetro polar más alto (debido a días de evaluación) fue de 8.794 cm, en ligera concordancia con lo encontrado en el presente estudio en la variedad Roja San Martín, siendo frutos de una longitud polar relativamente media-alta. Sin embargo, se encontró que la variedad Charola (5.939 cm) coincidió con lo reportado por

Gómez-Maqueo *et al.* (2020) en la variedad Fresa (fenotípicamente roja), siendo frutos notablemente pequeños.

Asimismo, en la **Tabla 12** se muestran los valores del eje ecuatorial mayor (EEMa) determinado en el fruto entero de las distintas variedades de tuna, siendo la Amarillo Plátano, Reyna 2, “Naranjona” y Roja San Martín aquellas con los valores más altos del EMa ($p < 0.0001$), en comparación del resto de variedades, con 5.996 – 6.109 cm. Por otro lado, las tunas que presentaron el menor EEMa fueron las variedades Amarilla Montesa, Cardona y Charola con 4.584 – 4.803 cm. De la misma manera que en el eje polar, de forma general, las variedades provenientes del Valle de Teotihuacán presentaron, en promedio, un EEMa más largo (5.723 cm) en comparación con las tunas provenientes de Altiplano Mexicano (5.278 cm).

En cuanto al EEme evaluado en las variedades de tuna, se observó que, de igual manera, las variedades Amarillo Plátano, Reyna 2, Roja San Martín y “Naranjona” fueron aquellas con los valores más altos del EEme (5.225 – 5.547 cm). Por otro lado, se encontró que las variedades Amarilla Montesa, Charola, Pico Chulo y Cardona presentaron los valores más pequeños en este parámetro, siendo significativamente ($p < 0.0001$) menores al resto de variedades con 4.262 – 4.468 cm. Asimismo, las tunas originarias del Altiplano Mexicano (4.766 cm) mostraron un EEme ligeramente más pequeño a comparación de las variedades provenientes del Valle de Teotihuacán (5.098 cm).

De manera general, como se observa en la **Tabla 12**, los valores de EEMa y EEme en el fruto entero (**Figura 19**, pág. 61) coincidieron casi de forma equivalente entre las variedades de tuna, presentando, además, una diferencia relativamente baja entre estos dos parámetros por fruto. Puesto que la tuna presenta, de manera general, una forma piriforme, este eje ecuatorial se encuentra ligeramente “aplastado” en la mayoría de los frutos, por lo que este muestra una parte más ancha que otra en esta zona, resultando en la formación de un eje ecuatorial

mayor y otro menor. Sin embargo, en diversos estudios (Dehbi *et al.*, 2014; Bariza *et al.*, 2017; Paucara, 2017; Martín del Campo *et al.*, 2019; Gómez-Maqueo *et al.*, 2020) se menciona la medición de un eje, diámetro o calibre ecuatorial en los frutos, pero no se especifica si este se trata del mayor o menor, pudiéndose llegar a pensar que el fruto, piriforme o no, presenta un solo eje ecuatorial homogéneo. En función de esto, Dehbi *et al.* (2014) reportaron un diámetro del fruto (ecuatorial) entre 4.50 – 5.50 cm, concordando con la mayoría de las variedades evaluadas en el presente estudio, particularmente en el eje ecuatorial menor, aunque también en el eje ecuatorial mayor en menor grado, siendo las variedades “Naranjona”, Reyna 2 y Amarillo Plátano las notables excepciones en este último parámetro. Se determinó lo anteriormente mencionado de forma equivalente en comparación con lo reportado por Bariza *et al.* (2017), donde este diámetro concordó con el eje ecuatorial menor de los frutos evaluados en el presente estudio (Anexo 4), siendo la Amarilla Montesa la variedad que presentó semejanza a lo reportado con los mismos autores. También, de acuerdo con lo reportado por Martín del Campo *et al.* (2019), se observó que, al llegar al máximo de crecimiento de los frutos (111 – 118 días), se alcanzó un diámetro ecuatorial superior a lo encontrado en las variedades de tuna del presente estudio, más pequeños con respecto a lo reportado por los mismos autores. Sin embargo, se encontró cierta concordancia entre los valores del eje ecuatorial mayor de las variedades “Naranjona” y Amarillo Plátano, y lo reportado por los mismos autores en el día 111 de desarrollo de los frutos. De forma similar, se determinó cierta similitud entre el eje ecuatorial menor de algunas de las variedades evaluadas en el presente estudio con lo reportado por Gómez-Maqueo *et al.* (2020) en tuna naranja, roja, blanca y verde con calibres ecuatoriales de 4.9, 4.5, 5.1 y 5.6 cm, respectivamente.

6.3.1.2. Cáscara

En cuanto al grosor de la cáscara de las variedades de tuna analizadas (Tabla 12), las variedades que presentaron un grosor significativamente menor ($p < 0.0001$) al resto de las variedades analizadas fueron la Amarilla Montesa y Pico Chulo. Por otro lado, las variedades que presentaron un mayor grosor ($p < 0.0001$) fueron la Cristalina, Cardona, Charola, Reyna (1 y 2), Roja San Martín, y Amarilla Miquihuana, siendo la Reyna 2 la tuna que presentó la cáscara más gruesa con 0.607 cm. También, se pudo encontrar una cáscara más gruesa en la

Reyna 2 en comparación con la Reyna 1, pudiendo considerar un incremento en el grosor de la cáscara a lo largo del desarrollo del fruto. Una ventaja de una cáscara más gruesa es que esta ofrece una mayor protección contra la mosca de la fruta (*Ceratitis capitata* W.), así como para mantener integridad (y color) durante el manejo postcosecha, como tras la eliminación de gloquidas y empaquetado (**Inglese et al., 1995**). Aunque, de acuerdo con lo reportado por **Martín del Campo et al. (2019)**, después de un periodo de decremento en el grosor de la cáscara hasta un punto de madurez hortícola, esta puede engrosar ligeramente. De igual manera, se puede observar que, de manera muy general, las variedades de tuna provenientes del Valle de Teotihuacán (0.501 cm) presentaron un mayor grosor que las variedades provenientes de Altiplano Mexicano (0.468 cm). Asimismo, en un estudio realizado por **Monroy-Gutiérrez et al. (2017)**, se reportaron valores de grosor de la cáscara para las variedades Amarilla Montesa, Amarillo Plátano, Reyna, Cristalina y Rojo Pelón (Roja Pelona), siendo 1.131 veces, 0.876 veces, 1.211 veces (1.037 veces, para Reyna 2), 0.787 veces, y 1.264 veces, respectivamente, a lo encontrado en las mismas variedades de tuna (**Anexo 4**). Así, las variedades Amarillo Plátano y Cristalina presentaron una cáscara más gruesa, y las variedades Amarilla Montesa, Reyna 1 (ligeramente la 2), y la Roja Pelona mostraron una cáscara más delgada con respecto a lo reportado por los mismos autores. Por otro lado, el grosor en cáscara de la variedad Amarilla Montesa fue 1.079 veces mayor con respecto a lo reportado por **Bariza et al. (2017)** en tuna argeliana. También, se pudo observar concordancia con lo reportado por **Martín del Campo et al. (2019)** en el tiempo de maduración de mayor concordancia en otros parámetros (111 – 118 días), entre 0.564 – 0.694 cm con lo encontrado en ciertas variedades evaluadas en el presente estudio (**Tabla 12**), como fueron las variedades la Roja San Martín y Reyna 2.

6.3.1.3. Pulpa

De manera similar a las dimensiones en el fruto entero, el eje polar de la pulpa de tuna (**Tabla 12**) fue significativamente mayor ($p < 0.0001$) en las variedades Amarillo Plátano, Reyna 2, Roja San Martín y Amarilla Miquihuana, siendo la primera aquella con la pulpa de mayor longitud (8.463 cm). Así, las variedades Reyna 2, Roja San Martín y Amarilla Miquihuana presentaron semejanza ($p > 0.05$), pero diferencia significativa ($p < 0.0001$) con

respecto al resto de frutos. Como en los casos anteriores, se observó que el fruto con la menor ($p < 0.0001$) longitud polar en su pulpa, con respecto al resto de variedades, fue la Cardona con 3.534 cm. Siendo, además, la tuna Charola el segundo fruto con menor eje polar en pulpa (4.536 cm) en comparación con los frutos evaluados. Asimismo, en concordancia con el desarrollo fisiológico de los frutos y lo encontrado en las dimensiones del fruto entero, la Reyna 2 mostró un tamaño polar de la pulpa (7.521 cm) significativamente ($p < 0.0001$) mayor que la Reyna 1 (6.253 cm), donde el fruto aún se encontraba en desarrollo fisiológico. Debido a las condiciones climáticas del año 2022, principalmente la sequía que azotó el norte del país (incluyendo al Altiplano Mexicano), se encontró que las variedades de tuna provenientes del Valle de Teotihuacán presentaron un tamaño de pulpa promedio (8.555 cm) sustancialmente mayor a aquellas originarias del Altiplano Mexicano (5.712 cm). De manera general, no se encontró concordancia en lo determinado en las distintas variedades de tuna con lo reportado por **Bariza et al. (2017)** en tuna argeliana, presentando la mayoría de las tunas evaluadas en el presente estudio una longitud polar (**Anexo 4**) considerablemente superior.

En cuanto al EEMa medido en pulpa de las distintas variedades de tuna (**Tabla 12**), se encontró que las variedades Amarillo Plátano y Reyna 2 fueron semejantes ($p > 0.05$), y presentaron los valores de EEMa significativamente ($p < 0.0001$) más altos con respecto al resto de variedades de tuna con 5.168 – 5.388 cm. Por otro lado, se determinó que las variedades Cardona y Charola presentaron el EEMa de menor valor ($p < 0.0001$) de todas las variedades de tuna evaluadas, entre 3.435 – 3.753 cm. Asimismo, se observó que la Reyna 2 presentó un tamaño significativamente ($p < 0.0001$) más grande que la Reyna 1, debido al periodo del desarrollo fisiológico en los frutos.

Por otro lado, se encontró que las variedades de tuna Amarilla Miquihuana, Reyna 2, Amarillo Plátano y Pico Chulo presentaron los valores más altos ($p < 0.0001$) en el EEme en la pulpa de los frutos, entre 4.358 – 4.538 cm. Mientras tanto, se determinó que las variedades Cardona y Charola fueron aquellas con los valores más bajos ($p < 0.0001$) que los demás

frutos. De igual manera, se determinó diferencia significativa ($p < 0.0001$) entre el EEme de la variedad (1 y 2), siendo notablemente de mayor longitud en el fruto con mayor madurez.

De manera general, como se observa en la **Tabla 12**, se encontró coincidencia entre los valores de los EEMa y EEme en pulpa (**Figura 20**, pág. 61) casi de forma equivalente entre las variedades de tuna, presentando, además, una diferencia relativamente baja entre estos dos parámetros por fruto. Con lo mencionado anteriormente en la **Sección 6.3.1.1**, diversos autores (**Bariza et al., 2017; Martín del Campo et al., 2019; Gómez-Maqueo et al., 2020**) mencionan la medición de un diámetro o calibre ecuatorial del fruto, sin embargo, al igual que en las dimensiones del fruto entero (véase **Sección 6.3.1.1**) no se especifica si este se trata del EEMa o EEme, pudiéndose llegar a pensar que el fruto, piriforme o no, presenta un solo eje ecuatorial homogéneo. En función de esto, **Bariza et al. (2017)**, reportaron un diámetro (eje ecuatorial) de la pulpa del fruto de 34.24 mm lo cual, como se puede observar en el **Anexo 4**, concuerda con lo determinado en las variedades Cardona (EEMa) y Amarilla Montesa (EEme), donde la mayoría de las variedades evaluadas en el presente estudio mostraron un diámetro ecuatorial superior (tanto del EEme como EEMa). También, de acuerdo con lo reportado por **Martín del Campo et al. (2019)**, se observó que, al llegar al máximo de crecimiento de los frutos (111 – 118 días), se alcanzó un diámetro ecuatorial superior a lo encontrado en las variedades de tuna del presente estudio, siendo ligeramente más pequeños con respecto a lo reportado por los mismos autores. Sin embargo, se encontró cierta concordancia entre los valores del EEMa de la variedad Amarillo Plátano con lo reportado por los mismos autores en el día 111 de desarrollo de los frutos. De forma similar, se determinó cierta similitud entre el EEme de algunas de las variedades evaluadas en el presente estudio con lo reportado por **Gómez-Maqueo et al. (2020)** en tuna naranja, roja, blanca y verde con calibres ecuatoriales de 4.9, 4.5, 5.1 y 5.6 cm, respectivamente.

Tabla 12. Dimensiones (cm) de variedades de tuna (*Opuntia* spp.) del Altiplano Mexicano y del Valle de Teotihuacán, en fruto entera (con cáscara), grosor de la cáscara, y dimensiones de la pulpa (sin cáscara).

Origen	Variedad	Fruto Entero			Cáscara	Pulpa		
		Polar	Ecuatorial Mayor (EEMa)	Ecuatorial Menor (EEme)	Grosor	Polar	Ecuatorial Mayor (EEMa)	Ecuatorial Menor (EEme)
	Cristalina	8.241 ± 0.842 d	5.355 ± 0.506 cd	4.899 ± 0.582 bc	0.511 ± 0.098 bcd	6.372 ± 0.899 cde	4.644 ± 0.651 cde	3.925 ± 0.462 c
	Amarilla Montesa	8.342 ± 1.071 d	4.584 ± 0.346 a	4.262 ± 0.363 a	0.287 ± 0.112 a	6.268 ± 0.858 cd	3.964 ± 0.390 b	3.464 ± 0.321 b
	Amarilla Venado	8.252 ± 0.505 d	5.578 ± 0.478 d	4.896 ± 0.434 b	0.463 ± 0.102 b	5.986 ± 0.526 c	4.500 ± 0.428 c	3.911 ± 0.408 c
SLP	Cardona	5.143 ± 0.653 a	4.697 ± 0.263 ab	4.468 ± 0.315 a	0.505 ± 0.195 bcd	3.534 ± 0.908 a	3.435 ± 0.250 a	3.115 ± 0.200 a
	Roja Pelona	7.722 ± 0.804 cd	5.552 ± 0.427 d	4.960 ± 0.165 bc	0.451 ± 0.099 b	6.343 ± 0.479 cde	4.708 ± 0.191 cdef	3.895 ± 0.282 c
	“ Naranjona”	7.886 ± 0.719 cd	6.018 ± 0.415 ef	5.225 ± 0.298 cde	0.484 ± 0.151 bc	6.028 ± 0.650 cd	5.099 ± 0.200 efg	4.016 ± 0.418 c
	Charola	5.939 ± 0.978 b	4.803 ± 0.454 ab	4.338 ± 0.379 a	0.520 ± 0.155 bcd	4.536 ± 0.675 b	3.753 ± 0.470 ab	3.116 ± 0.461 a
	Reyna 1	7.425 ± 0.641 c	5.324 ± 0.463 cd	4.828 ± 0.370 b	0.519 ± 0.098 bcd	6.253 ± 0.448 cd	4.795 ± 0.604 cdef	4.056 ± 0.357 cd
	Reyna 2	9.458 ± 1.047 ef	6.075 ± 0.399 f	5.433 ± 0.298 e	0.607 ± 0.174 d	7.521 ± 0.578 f	5.388 ± 0.388 g	4.396 ± 0.322 e
Edomex	Pico Chulo	8.202 ± 0.645 d	5.060 ± 0.680 bc	4.387 ± 0.247 a	0.315 ± 0.080 a	6.611 ± 2.304 cde	4.585 ± 1.367 cd	4.538 ± 0.281 e
	Roja San Martín	9.214 ± 0.632 e	5.996 ± 0.253 ef	5.295 ± 0.216 de	0.588 ± 0.055 cd	7.121 ± 0.372 ef	5.018 ± 0.286 defg	4.038 ± 0.227 c
	Amarillo Plátano	10.179 ± 0.692 f	6.109 ± 0.281 f	5.547 ± 0.295 e	0.476 ± 0.137 bc	8.463 ± 0.364 g	5.168 ± 0.292 fg	4.490 ± 0.288 e
Tamps.	Amarilla Miquihuana	9.652 ± 1.265 ef	5.638 ± 0.543 de	5.079 ± 0.582 bcd	0.523 ± 0.138 bcd	6.805 ± 0.455 def	4.933 ± 0.349 cdefg	4.358 ± 0.430 de

* Los resultados son valores promedio de 10 réplicas por cada muestra evaluada.

** Distintas letras indican diferencia estadísticamente significativa entre las muestras, $\alpha = 0.05$ ($p < 0.05$).

6.3.2. Peso

6.3.2.1. Fruto entero

Como se puede observar en la **Tabla 13**, en congruencia con lo encontrado en la **Sección 6.3.1**, la tuna Amarillo Plátano presentó el mayor peso del fruto entero más alto (194.514 g), de forma significativa ($p < 0.0001$), con respecto al resto de variedades de tuna. Asimismo, las variedades Amarilla Miquihuana, Roja San Martín, Cristalina, Pico Chulo y Reyna 2 no mostraron diferencia significativa entre sí ($p > 0.05$), pero sí un peso significativamente ($p < 0.0001$) superior al resto de variedades (excepto Amarillo Plátano) con un peso entre 135.317 – 153.306 g. De la misma manera, la Reyna 2 presentó un peso significativamente ($p < 0.0001$) superior con respecto a la Reyna 1, dado que esta última se encontraba en un estado menor de madurez. Por otro lado, las variedades que presentaron el menor peso de fruto entero fueron la Cardona y la Charola con un peso significativamente ($p < 0.0001$) inferior al resto de variedades con 67.304 – 75.065 g. Sin embargo, también se observó que los frutos provenientes del Valle de Teotihuacán presentaron un peso del fruto entero (148.242 g) mayor con respecto a aquellos originarios del Altiplano Mexicano (112.349 g). Asimismo, se encontró diferencia en el peso del fruto entero entre lo determinado en el presente estudio en las variedades Cristalina, Reyna, Roja Pelona y “Naranjona”, y lo reportado por **Pimienta & Mauricio (1989: citados por Pimienta-Barrios, 1994)**, siendo 1.627 veces menor, 1.811 veces menor para Reyna 1 (y 1.220 veces menor para Reyna 2), 1.108 veces mayor, y 1.078 veces mayor, respectivamente, a lo reportado por los mismos autores en las correspondientes variedades. Por otro lado, **Corrales & Hernández (2005)** reportaron un peso del fruto entero en las variedades Cristalina y Naranjona aproximadamente 1.525 y 1.017 veces mayores, respectivamente, con respecto a lo encontrado en el presente estudio. También, se encontró diferencia entre las variedades evaluadas en el presente estudio con lo reportado por **El-Gharras et al. (2006)** en tuna marroquí, presentando estas últimas un peso de fruto entero promedio de 111.17 g. Así, la mayoría de las variedades evaluadas en el presente estudio mostraron un tamaño superior a lo reportado por **El-Gharras et al. (2006)**, siendo la Cardona, Charola, Amarilla Montesa variedades considerablemente más pequeñas, además de la Reyna 1, fruto el cual aún se encontraba en desarrollo. Aunque, de manera general, las va-

riedades de tuna evaluadas presentaron un peso mayor a tuna proveniente de Tenerife (**Medina et al., 2007**), tanto en *O. dillenii* como en *O. ficus-indica* (variedades de pulpa verde y naranja), siendo estos primeros frutos considerablemente pequeños, las tunas Cardona y Charola presentaron un peso del fruto entero menor al de *O. ficus-indica* (tanto frutos de pulpa verde como de pulpa naranja), de tuna tinerfeña. También, en comparación con algunas variedades de tuna sudafricana (**de Wit et al., 2010**), se encontraron similitudes con los frutos evaluados en el presente estudio. Así, estos últimos, de manera general, presentaron un promedio total mayor de peso (126.15 g) que la tuna sudafricana (105.29 g), contando en México con tunas de mayor tamaño. Aunque no se contó con una tuna tan pequeña como la Pintadera (**Aquino et al., 2012**), se encontraron similitudes con el peso en tunas rojas reportado por **Aquino et al. (2012)**, presentando las variedades provenientes del Valle de Teotihuacán mayor similitud en este parámetro que aquellas originarias del Altiplano Mexicano. De manera general, las variedades evaluadas en el presente estudio mostraron un peso superior del fruto en comparación con tuna marroquí estudiada por **Dehbi et al. (2014)**, así como en tuna argelina (**Bariza et al., 2017**), presentando las variedades originarias del Altiplano Mexicano mayor similitud a la tuna marroquí. Aunque la tuna boliviana (**Paucara, 2017**) presentó un peso elevado (a comparación de frutos provenientes de distintas partes del mundo anteriormente mencionados), se encontró similitud entre las variedades Amarilla Montesa y Reyna 1 con lo reportado por **Paucara (2017)** en tuna roja (102.77 g) y tuna blanca (106.69 g). También, la variedad Roja San Martín mostró similitud con lo reportado en tuna naranja (**Paucara, 2017**). Asimismo, se observó concordancia entre lo reportado por **Martín del Campo et al. (2019)** en la variedad Burrón (día 118) y lo determinado en el presente estudio en la variedad Amarillo Plátano, siendo el fruto de mayor tamaño. Aunque las variedades Reyna y Cristalina se pueden considerar como variedades de tuna blanca-verde (volviéndose más blancos conforme su maduración), las cuales al momento de su estudio presentaron tonalidades más verdes, se encontró mayor concordancia con lo reportado en variedades de tuna canaria (de las Islas Canarias) Blanco Buenavista por **Gómez-Maqueo et al. (2020)** que, con tuna canaria verde, siendo la primera de 129.6 g. Aun así, tanto la variedad Reyna 2 como Cristalina presentaron un peso total mayor en comparación con la variedad Blanco Buenavista (**Gómez-Maqueo et al., 2020**).

6.3.2.2. Cáscara

Se determinó que ligeramente más de la mitad de las tunas (Reyna 2, Reyna 1, Amarilla Miquihuana, Charola, Cardona, Roja San Martín y “Naranjona”) fueron aquellas con el mayor porcentaje, de forma significativa ($p < 0.003$), de la cáscara del fruto (**Tabla 14**). De igual manera, se determinó que las variedades Amarilla Montesa, Amarillo Plátano, Amarilla Venado, Pico Chulo, Cristalina, Roja Pelona y Reyna 2 fueron aquellas con el menor porcentaje de cáscara de las variedades evaluadas, siendo todas estadísticamente iguales entre sí ($p > 0.05$). Sin embargo, las tunas Amarilla Montesa, Amarillo Plátano, Amarilla Venado, Pico Chulo, Cristalina y Roja Pelona mostraron un contenido de cáscara por debajo de lo reportado por **Moßhammer et al. (2006)** entre 36 – 48 %. También, se encontró que los frutos provenientes del Valle de Teotihuacán mostraron un contenido de cáscara en promedio (37.78 %) ligeramente menor a aquellas tunas originarias del Altiplano Mexicano (38.43 %). Se encontraron similitudes con el porcentaje de cáscara de tunas rojas reportado por **Aquino et al. (2012)**, presentando las variedades provenientes del Valle de Teotihuacán mayor similitud en este parámetro que aquellas originarias del Altiplano Mexicano. Por otro lado, se determinó que las variedades evaluadas en el presente estudio mostraron un porcentaje de cáscara inferior, de manera general, con respecto a lo reportado por **Aquino et al. (2012)**, en tunas rojas. De la misma manera, se observó concordancia entre las variedades Reyna 1, Amarilla Miquihuana y Cardona con lo reportado en tuna canaria por **Gómez-Maqueo et al. (2020)**. Sin embargo, el resto de las variedades mostraron un contenido de cáscara menor a estas tunas canarias.

Se determinó que las tunas “Naranjona”, Reyna 2, Amarilla Miquihuana, Amarillo Plátano y Roja San Martín fueron aquellas con el mayor peso, de forma significativa ($p < 0.0001$), de la cáscara del fruto, mostrando congruencia con lo encontrado en la **Sección 6.3.1**. De igual manera, se determinó que las variedades Amarilla Montesa, Cardona, Charola, Amarilla Venado y Reyna 1 fueron aquellas con el menor peso en cáscara de las variedades evaluadas. Sin embargo, se encontró que los frutos provenientes del Valle de Teotihuacán, al igual que en lo mencionado en la **Sección 6.3.2.1**, mostraron un peso en cáscara en promedio (53.62 g) mayor con respecto a aquellas tunas originarias del Altiplano Mexicano

(41.23 g). Se determinó que las variedades Cristalina, Reyna, Roja Pelona y “Naranjona” mostraron valores de peso en cáscara 1.656 veces menor, 1.920 veces menor para Reyna 1 (1.275 veces menor para Reyna 2), 1.246 veces menor, y 1.099 veces mayor, respectivamente, con lo reportado por **Pimienta & Mauricio (1989: citados por Pimienta-Barrios, 1994)** en las mismas variedades. También, se encontró diferencia entre las variedades evaluadas en el presente estudio con lo reportado por **El-Gharras et al. (2006)** en tuna marroquí, presentando estas últimas un peso de cáscara promedio de 43.74 g. Así, algunas de las variedades evaluadas en el presente estudio mostraron un peso en cáscara superior a lo reportado por **El-Gharras et al. (2006)**, pero también, aproximadamente el 46 % de las variedades fueron presentaron un menor peso. De forma general, las variedades provenientes del Valle de Teotihuacán presentaron mayor peso en cáscara que aquellas originarias del Altiplano Mexicano, a comparación de lo reportado por los mismos autores. También, se observó que el peso de cáscara en las variedades de tuna evaluadas en el presente estudio se encontró en valores, de forma general, dentro de lo reportado por **Dehbi et al. (2014)** en tuna marroquí (aprox. 35 – 50 g). Sin embargo, algunas variedades más pequeñas, como la Amarilla Montesa y la Cardona presentaron un menor peso en cáscara, de la misma manera que algunas de las variedades más grandes, como la Reyna 2, Amarillo Plátano y Roja San Martín hayan presentado un mayor contenido de peso en cáscara. De la misma manera, se observó gran diferencia entre el peso de cáscara de tuna argelina (26.45 g) (**Bariza et al., 2017**) con las variedades de tuna evaluadas en el presente estudio, siendo la variedad Cardona la más cercana a esta tuna del norte de África. Por otro lado, la tuna boliviana (**Paucara, 2017**) presentó un peso de cáscara de 61.73 g en tuna naranja, mostrando cierta similitud con lo encontrado en la Amarillo Plátano y, en cierta medida, la Amarilla Miquihuana, siendo estas 1.025 y 1.054 veces menores, respectivamente, que lo reportado en esta tuna boliviana por **Paucara (2017)**. Asimismo, se observó que, pudiéndose deber a la sequía (relativamente baja humedad), a la región de cultivo, o simplemente por la naturaleza fenotípica de la variedad, se obtuvo un peso en cáscara menor a la variedad Burrón estudiada por **Martín del Campo et al. (2019)**.

6.3.2.3. Pulpa

En cuanto al contenido de pulpa, tanto entera (con semillas) como sin semillas (**Tabla 14**), se encontró que, en congruencia con lo determinado anteriormente, las variedades Reyna 2, Roja Pelona, Cristalina, Pico Chulo, Amarilla Venado, Amarillo Plátano y Amarilla Montesa fueron aquellas con el peso significativamente ($p < 0.003$) más alto del resto de variedades con 61.66 – 70.30 % (con semillas) y 58.76 – 67.49 % (sin semillas). Sin embargo, las tunas Roja Pelona, Cristalina, Pico Chulo, Amarilla Venado, Amarillo Plátano y Amarilla Montesa mostraron un contenido de pulpa entera por encima de lo reportado por **Moßhammer et al. (2006)** entre 39 – 64 %. A su vez, se determinó que aquellas variedades provenientes del Valle de Teotihuacán presentaron un peso en pulpa, en promedio, ligeramente superior al de los frutos originarios del Altiplano Mexicano. Aunque, de manera general, las variedades de tuna evaluadas presentaron un porcentaje de pulpa (con semillas) mayor a tuna proveniente de Tenerife (**Medina et al., 2007**), tanto en *O. dillenii* como en *O. ficus-indica* (variedades de pulpa verde y naranja), las tunas “Naranjona”, Roja San Martín y Cardona presentaron un porcentaje de pulpa menor al de *O. dillenii*, de tuna tinerfeña. Por otro lado, se observó una diferencia considerable en lo determinado en las variedades Cardona y Roja Pelona con lo determinado en tuna neoleonesa, siendo 1.314 y 1.065 veces mayor con respecto a lo reportado por **Chavez-Santoscoy et al. (2009)**. También, en comparación con algunas variedades de tuna sudafricana (**de Wit et al., 2010**), se encontró similitud con los frutos evaluados en el presente estudio. Así, estos últimos, de manera general, presentaron un promedio total mayor de porcentaje de pulpa (61.82 %) que la tuna sudafricana (59.98 %), siendo valores cercanos entre sí. Por otro lado, se determinó que las variedades evaluadas en el presente estudio mostraron un porcentaje de pulpa (con y sin semillas) superior (alcanzando hasta el 70 %), de manera general, con respecto a lo reportado por **Aquino et al. (2012)**, las cuales alcanzaron hasta un 63 % de pulpa, en tunas rojas. De la misma manera, se observó concordancia principalmente entre las variedades “Naranjona”, Roja San Martín y Cardona con lo reportado en tuna canaria por **Gómez-Maqueo et al. (2020)**, en las variedades Fresa y Blanco Fasnía. Sin embargo, el resto de las variedades mostraron un contenido de pulpa considerablemente mayor a estas tunas canarias.

En cuanto al peso de pulpa, tanto entera (con semillas) como sin semillas (**Tabla 13**), se encontró que, en congruencia con lo determinado anteriormente, la variedad Amarillo Plátano fue aquella con el peso significativamente ($p < 0.0001$) más alto del resto de variedades con 134.314 g; mientras que las tunas Cardona y Charola presentaron el menor peso de pulpa a comparación del resto de frutos, siendo estos dos últimos 3.538 y 3.002 veces menor, respectivamente, a lo encontrado en la Amarillo Plátano. También, se observó lo anteriormente revisado entre los frutos Reyna (1 y 2), mostrando el fruto con mayor madurez un peso significativamente ($p < 0.0001$) superior de pulpa. A su vez, se determinó que aquellos frutos provenientes del Valle de Teotihuacán presentaron un peso en pulpa, en promedio, superior al de las variedades originarias del Altiplano Mexicano, en ambos parámetros (pulpa con y sin semillas). Sin embargo, en cuanto a la parte comestible de los frutos (pulpa con semillas) reportada por Pimienta & Mauricio (1989: citados por Pimienta-Barrios, 1994), se encontró que las variedades Cristalina, Reyna 1 y Reyna 2 del presente estudio mostraron un peso 1.523, 2.890, 1.963 veces menores, respectivamente, con respecto a lo reportado por los mismos autores; mientras que las tunas Roja Pelona y “Naranjona” fueron 1.471 y 1.114 veces mayores, respectivamente, con respecto a lo reportado en las mismas variedades por Pimienta & Mauricio (1989: citados por Pimienta-Barrios, 1994). También, se encontró diferencia entre las variedades evaluadas en el presente estudio con lo reportado por **El-Gharras *et al.* (2006)** en tuna marroquí, presentando estas últimas un peso de pulpa promedio de 61.70 g. Así, algunas de las variedades evaluadas en el presente estudio mostraron un peso en pulpa menor a lo reportado por **El-Gharras *et al.* (2006)**, como la Cardona y Charola. Sin embargo, la mayoría de los frutos evaluados en el presente estudio presentaron un mayor peso al de tuna marroquí. También, se observó que el peso de pulpa en las variedades de tuna evaluadas en el presente estudio se encontró, de forma general, por encima de lo reportado por **Dehbi *et al.* (2014)** en tuna marroquí (aprox. 40 – 60 g), sin embargo, la Cardona presentó un menor peso en pulpa a comparación de estas últimas, el mismo comportamiento a comparación de tuna argelina (**Bariza *et al.*, 2017**). De igual forma, la mayoría de las variedades evaluadas en el presente estudio mostraron un peso de pulpa superior al reportado por **Bouzoubaâ *et al.* (2016)** en tuna marroquí, tanto de variedades amarillas como anaranjadas. No obstante, la tuna Cardona presentó una gran similitud con la variedad de tuna marroquí Achefri (naranja) originaria de Asgherkis, y la Reyna 1 con el peso de la tuna Amoulem (naranja) originaria

de Arbaâ Sahel (**Bouzoubaâ et al., 2016**). Por otro lado, la tuna boliviana (**Paucara, 2017**) presentó un peso de pulpa de 58.54 g en tuna blanca, mostrando cierta similitud con lo encontrado en la Reyna 1, siendo esta última 1.105 veces mayor y, de igual manera, se encontró concordancia entre las tunas Roja San Martín y Amarilla Montesa con lo reportado por **Paucara (2017)** en tuna naranja.

6.3.2.4. Semillas

Finalmente, pero no menos importante, se encontró que la tuna Reyna 1 fue aquella con mayor contenido de semillas en su pulpa (**Tabla 14**) con 5.34 %. Al contrario de esto, las variedades que presentaron el contenido más bajo de semillas (estadísticamente iguales entre sí: $p > 0.05$) fueron la Roja San Martín, Cardona, “Naranjona”, Amarilla Montesa, Reyna 2, Roja Pelona, Amarilla Miquihuana, Amarillo Plátano y Amarilla Venado, siendo significativamente ($p < 0.0002$) menores al resto. Un punto importante que observar es que la Reyna 1 presentó un contenido significativamente mayor ($p < 0.0002$) de semillas en comparación con la Reyna 2, debido al aumento de masa (pulpa) en la segunda. Sin embargo, las tunas Roja San Martín, Cardona, “Naranjona”, Amarilla Montesa, Reyna 2, Roja Pelona y Amarilla Miquihuana (presentando las últimas cuatro un contenido muy cercano) mostraron un contenido de semillas por debajo de lo reportado por **Moßhammer et al. (2006)** entre 3 – 7 %. Asimismo, se pudo determinar que los frutos provenientes del Valle de Teotihuacán presentaron un contenido de semillas, en promedio (3.59 %), ligeramente superior al de aquellos originarios del Altiplano Mexicano (3.20 %). Todas las variedades de tuna evaluadas presentaron un porcentaje de semillas (con semillas) mayor a tuna proveniente de Tenerife (**Medina et al., 2007**), tanto en *O. dillenii* como en *O. ficus-indica* (variedades de pulpa verde y naranja), presentando estas últimas un contenido de semillas del 10.6 y 5.6 %, respectivamente. Por otro lado, se determinó que las variedades evaluadas en el presente estudio mostraron un porcentaje de semillas muy similar, de manera general, con respecto a lo reportado por **Aquino et al. (2012)** en tunas rojas. De la misma manera, se observó concordancia entre las variedades Amarilla Venado con lo reportado en tuna canaria por **Gómez-Maqueo et al. (2020)** en la variedad Blanco Buenavista, así como entre la variedad Reyna 1 con la tuna

canaria Blanco Fasnía (**Gómez-Maqueo et al., 2020**). Sin embargo, el resto de variedades mostraron un contenido de semillas menores a estas tunas canarias.

De la misma forma, se encontró que las tunas Cristalina, Pico Chulo y Amarilla Plátano fueron aquellas con mayor peso de semillas en su pulpa (**Tabla 13**) entre 5.688 – 6.137 g. Al contrario de esto, las variedades que presentaron el contenido más bajo de semillas fueron la Cardona, Amarilla Montesa y Charola, siendo significativamente ($p < 0.0001$) menores al resto. Un punto importante que observar es que la Reyna 1 presentó un contenido significativamente mayor ($p < 0.0001$) de semillas que la Reyna 2. Con esto, se puede suponer que después de alcanzar cierto grado de madurez en el fruto, aunado al desarrollo de las semillas, se siguen desarrollando la cáscara y la pulpa del fruto aumentando en masa. Asimismo, se pudo determinar que los frutos provenientes del Valle de Teotihuacán presentaron un peso de semillas en promedio (5.00 g) superior al de aquellos originarios del Altiplano Mexicano (3.44 g). Así, se determinó que las variedades Cristalina, Reyna, Roja Pelona y “Naranjona” mostraron valores de peso en semillas menores a lo reportado por **Pimienta & Mauricio (1989: citados por Pimienta-Barrios, 1994)** en las mismas variedades. También, se encontró una considerable diferencia entre las variedades evaluadas en el presente estudio con lo reportado por **El-Gharras et al. (2006)** en tuna marroquí, presentando estas últimas un peso de semillas promedio de 5.72 g. Así, algunas de las variedades evaluadas en el presente estudio mostraron un peso en pulpa mayor a lo reportado por **El-Gharras et al. (2006)**, como la Pico Chulo y Amarillo Plátano (frutos de mayor tamaño). Sin embargo, la mayoría de los frutos evaluados en el presente estudio presentaron un menor peso al de la tuna marroquí. Sin embargo, se observó que la tuna argelina (**Bariza et al., 2017**), presentó un contenido de semillas (3.24 g) similar a las variedades “Naranjona”, Roja San Martín y ligeramente con la Roja Pelona, siendo 1.032 veces menor, 1.037 veces mayor y 1.130, respectivamente. No obstante, aproximadamente el 69 % de las tunas evaluadas presentaron un contenido mayor con respecto a esta tuna argelina (**Bariza et al., 2017**). Por otro lado, la tuna boliviana (**Paucara, 2017**) presentó un peso de cáscara de 3.10 g en tuna naranja, mostrando cierta similitud con lo encontrado en la “Naranjona”, siendo esta 1.013 veces mayor que lo reportado en esta tuna boliviana por **Paucara (2017)**, pero no con el resto de variedades. Asimismo, se observó

que, al igual que en lo observado en la cáscara (véase la **Sección 6.3.2.2**), se obtuvo un peso en cáscara menor a la variedad Burrona estudiada por **Martín del Campo et al. (2019)**.

Tabla 13. Peso (g) de variedades de tuna (*Opuntia* spp.) del Altiplano Mexicano y del Valle de Teotihuacán, de fruto entero y sus principales constituyentes físicos (cáscara, pulpa y semillas).

Origen	Variiedad	Fruta Entera	Cáscara	Pulpa c/semillas	Pulpa s/semillas	Semillas
	Cristalina	147.52 ± 34.89 ef	47.71 ± 14.54 bc	99.81 ± 27.43 f	94.12 ± 27.67 fg	5.69 ± 1.77 gh
	Amarilla Montesa	99.10 ± 17.88 b	27.68 ± 7.14 a	71.42 ± 23.11 cd	68.86 ± 24.03 cd	2.56 ± 1.21 ab
	Amarilla Venado	123.07 ± 15.62 d	37.31 ± 8.14 ab	85.76 ± 21.52 cdef	81.50 ± 21.04 defg	4.27 ± 1.01 def
SLP	Cardona	67.30 ± 12.21 a	29.34 ± 7.50 a	37.97 ± 16.41 a	36.19 ± 16.21 a	1.78 ± 0.37 a
	Roja Pelona	128.49 ± 16.80 de	41.72 ± 8.70 b	86.77 ± 20.15 def	83.11 ± 20.37 defg	3.66 ± 0.75 cde
	"Naranjona"	122.92 ± 23.19 cd	57.16 ± 9.94 cd	65.76 ± 27.06 bcd	62.63 ± 27.45 bcd	3.14 ± 0.85 bc
	Charola	75.07 ± 19.41 a	30.32 ± 10.75 a	44.74 ± 21.31 ab	42.12 ± 21.54 ab	2.62 ± 0.88 ab
	Reyna 1	103.23 ± 32.67 bc	38.53 ± 15.31 ab	64.70 ± 40.71 bc	59.61 ± 41.19 bc	5.09 ± 1.47 fg
	Reyna 2	153.31 ± 22.50 f	58.05 ± 9.95 cd	95.26 ± 21.34 ef	90.93 ± 21.65 efg	4.32 ± 0.72 ef
Edomex	Pico Chulo	153.04 ± 12.53 f	48.35 ± 12.05 bc	104.69 ± 20.79 f	98.62 ± 20.91 g	6.07 ± 1.35 h
	Roja San Martín	137.12 ± 12.54 def	62.99 ± 10.50 d	74.13 ± 14.08 cde	70.77 ± 14.36 cde	3.36 ± 0.65 bcd
	Amarillo Plátano	194.51 ± 26.41 g	60.20 ± 14.86 d	134.31 ± 23.41 g	128.18 ± 24.00 h	6.14 ± 1.26 h
Tamps.	Amarilla Miquihuana	135.32 ± 28.13 def	58.59 ± 23.95 cd	76.73 ± 26.17 cde	72.92 ± 26.23 cdef	3.82 ± 1.01 cde

* Los resultados son valores promedio de 10 réplicas por cada muestra evaluada.

** Distintas letras indican diferencia estadísticamente significativa entre las muestras, $\alpha = 0.05$ ($p < 0.05$).

Tabla 14. Porcentajes (%) de las partes físicas principales constituyentes de variedades de tuna (*Opuntia* spp.) del Altiplano Mexicano y del Valle de Teotihuacán: cáscara, pulpa con y sin semillas, y semillas.

Origen	Variiedad	Cáscara	Pulpa con semillas	Pulpa sin semillas	Semillas
	Cristalina	32.61 ± 7.39 abc	67.39 ± 7.39 bcd	63.26 ± 7.44 bcdef	4.14 ± 1.97 d
	Amarilla Montesa	29.70 ± 12.81 a	70.30 ± 12.81 d	67.49 ± 14.48 f	2.81 ± 1.82 abc
	Amarilla Venado	31.22 ± 9.80 ab	68.78 ± 9.80 cd	65.30 ± 9.72 def	3.48 ± 0.81 abcd
SLP	Cardona	45.41 ± 16.35 d	54.59 ± 16.35 a	51.93 ± 16.55 abc	2.66 ± 0.47 a
	Roja Pelona	33.07 ± 8.71 abc	66.93 ± 8.71 bcd	64.02 ± 9.02 cdef	2.91 ± 0.80 abc
	"Naranjona"	48.86 ± 16.12 d	51.14 ± 16.12 a	48.40 ± 17.09 a	2.74 ± 1.28 ab
	Charola	43.40 ± 20.63 cd	56.60 ± 20.63 ab	52.72 ± 22.06 abc	3.88 ± 2.14 bcd
	Reyna 1	41.37 ± 21.20 bcd	58.63 ± 21.20 abc	53.29 ± 22.89 abcd	5.34 ± 2.13 e
	Reyna 2	38.34 ± 7.24 abcd	61.66 ± 7.24 abcd	58.76 ± 7.56 abcdef	2.90 ± 0.70 abc
Edomex	Pico Chulo	32.05 ± 9.40 abc	67.95 ± 9.40 bcd	63.98 ± 9.86 cdef	3.97 ± 0.84 cd
	Roja San Martín	46.14 ± 8.02 d	53.86 ± 8.02 a	51.36 ± 8.13 ab	2.50 ± 0.69 a
	Amarillo Plátano	31.01 ± 6.62 ab	68.99 ± 6.62 cd	65.75 ± 6.95 ef	3.23 ± 0.89 abcd
Tamps.	Amarilla Miquihuana	43.14 ± 12.76 cd	56.86 ± 12.76 ab	53.90 ± 12.68 abcde	2.96 ± 1.19 abcd

* Los resultados son valores promedio de 10 réplicas por cada muestra evaluada.

** Calculado a partir de cada parte constituyente de los frutos.

*** Distintas letras indican diferencia estadísticamente significativa entre las muestras, $\alpha = 0.05$ ($p < 0.05$).

6.4. Color instrumental

Se contó con distintas variedades de tuna con distintos colores, siendo verdes, naranjas, amarillas, y rojas. A continuación, se muestran los parámetros de color de las 3 partes analizadas de tuna: cáscara externa (**Tabla 15**), cáscara interna (**Tabla 16**) y pulpa (**Tabla 17**).

Para el color en la cáscara externa de las variedades de tuna analizadas (**Tabla 15**), en cuanto a la luminosidad del color (L^*), de manera general, se puede observar que las tunas verdes tienen una mayor luminosidad, seguidas por las amarillas, luego naranjas y finalmente las rojas, siendo significativamente diferentes ($p < 0.05$). Esto coincide con lo reportado por **Chavez-Santoscoy et al. (2009)** extrapolado a partir de sus mediciones en pulpa. En cuanto al parámetro a^* , el cual se refiere al eje verde (-a) — rojo (+a), las tunas rojas se encuentran en valores más altos en este eje, mientras que las tunas verdes tienen valores negativos. Asimismo, el parámetro b^* de color, el cual se refiere al eje azul (-b) — amarillo (+b), todas se encuentran en el lado positivo del eje, por lo que ninguna tuna posee pigmentos que presenten estas tonalidades azules. Sin embargo, las muestras de tuna verde tuvieron un valor significativamente mayor ($p < 0.05$) en este parámetro que aquellas tunas rojas. Así, lo obtenido en estos tres parámetros coincide, de manera general, con lo reportado por **Gómez-Maqueo et al. (2020)**. Por otro lado, en la saturación del color (C^*), la Reyna 2 tiene una saturación significativamente mayor ($p < 0.05$) que la Reyna 1, lo cual implica un mayor brillo. Asimismo, se puede ver que las variedades de tuna roja de manera general tienen una menor saturación del color, siendo más opacas; y las variedades de tonalidades verdes son más brillantes. Así, en cuanto al tono o matiz del color (h) de las variedades de tuna analizadas, se convierte al color en ángulos, encontrándose aproximadamente: el rojo en 0° (o 360°), el naranja en 45° , el amarillo en 90° , y el verde en 180° (**Jiménez, 2017**); lo cual coincide con lo determinado en estas evaluaciones. Asimismo, se encontró concordancia en lo reportado por **Martín del Campo et al. (2019)** con lo encontrado en variedades verde-blancas de tuna evaluadas en el presente estudio, en todos los parámetros del color anteriormente mencionados. Las tunas evaluadas, ya sea por la naturaleza fenotípica de su variedad o por la sequía de este año, se encontraban verdes en su mayoría en su cáscara externa (teniendo valores

altos del tono) y, aunque ninguna variedad se determinó puramente verde (sino con distintas tonalidades café-amarillas), las variedades verdes de tuna (en cáscara externa) presentan un matiz del color de aproximadamente 100°.

Tabla 15. Color instrumental en el espacio CIEL*a*b* en la cara externa de cáscara de variedades de tuna (*Opuntia* spp.) del Altiplano Mexicano y del Valle de Teotihuacán.

Origen	Variedad	Cáscara Exterior				
		L*	a*	b*	C*	h (°)
	Cristalina	57.05 ± 5.26 hi	-5.91 ± 1.80 ab	33.40 ± 4.24 i	33.98 ± 4.10 h	100.27 ± 3.49 de
	Amarilla Montesa	47.49 ± 3.22 ef	8.02 ± 6.90 f	23.15 ± 3.96 f	25.38 ± 4.25 e	101.27 ± 65.01 de
	Amarilla Venado	55.14 ± 3.82 g	-1.54 ± 4.92 d	27.89 ± 4.41 g	28.37 ± 4.27 f	92.37 ± 10.77 d
SLP	Cardona	36.95 ± 2.54 b	19.92 ± 4.07 j	6.55 ± 1.94 b	21.08 ± 3.95 d	18.72 ± 6.19 a
	Roja Pelona	45.05 ± 3.72 d	10.86 ± 5.29 g	13.06 ± 3.92 c	17.77 ± 3.96 c	50.96 ± 17.27 b
	"Naranjona"	48.95 ± 4.98 f	16.74 ± 3.08 i	16.85 ± 3.62 d	23.98 ± 3.42 e	45.01 ± 7.88 b
	Charola	42.43 ± 3.25 c	12.96 ± 2.83 h	5.08 ± 1.21 b	14.02 ± 2.56 b	22.27 ± 6.89 a
	Reyna 1	58.40 ± 3.12 i	-7.12 ± 0.88 a	30.12 ± 4.14 h	30.98 ± 4.02 g	103.54 ± 2.48 e
	Reyna 2	55.29 ± 7.31 gh	-3.23 ± 2.86 cd	36.25 ± 6.08 j	36.54 ± 5.83 i	95.71 ± 5.69 de
Edomex	Pico Chulo	48.46 ± 2.54 f	-4.24 ± 2.79 bc	24.53 ± 3.26 f	24.52 ± 4.65 e	100.02 ± 7.23 de
	Roja San Martín	34.69 ± 5.17 a	9.74 ± 2.22 fg	2.51 ± 1.52 a	10.16 ± 2.26 a	14.24 ± 9.45 a
	Amarillo Plátano	53.59 ± 2.92 g	3.74 ± 4.27 e	28.19 ± 3.29 g	28.72 ± 3.56 f	82.83 ± 8.03 c
Tamps.	Amarilla Miquihuana	45.90 ± 2.35 de	14.66 ± 3.47 h	20.03 ± 3.47 e	25.01 ± 3.77 e	53.91 ± 7.65 b

** Los resultados son valores promedio de 36 réplicas, por cada muestra evaluada.

*** Distintas letras indican diferencia estadísticamente significativa entre las muestras, $\alpha = 0.05$ ($p < 0.05$).

La cáscara interna de la tuna se encuentra en una relación más cercana con el color de la pulpa que de la cáscara externa, dado que se encuentra en contacto directo con la pulpa. Así, en cuanto al color en esta parte del fruto (**Tabla 16**), al igual que en la cáscara externa, las tunas de color verde presentaron valores de luminosidad significativamente mayores ($p < 0.05$) que las otras variedades amarillas, naranjas y rojas, siendo las variedades rojas las más oscuras. Por otro lado, en el parámetro a* se identificó que las variedades rojizas presentaron valores altos. Sin embargo, la variedad Amarilla Miquihuana también presentó tonalidades rojizas significativamente altas ($p < 0.05$). Al igual que en la cáscara externa, en el eje b* las variedades rojas presentaron cantidades mínimas de este parámetro. En cuanto a la saturación del color, aunque las variedades Amarilla Venado y Amarilla Miquihuana presentaron los mayores valores en esta fracción de la tuna de forma significativa ($p < 0.0001$), el resto de las variedades presentaron un valor mayor a 25.0. En este caso, la Reyna 2 presentó un brillo significativamente menor ($p < 0.0001$) que la Reyna 1. En el ángulo del tono del color en

esta fracción de la tuna se determinó que no hubo diferencia significativa en el color en las variedades Reyna (1 y 2; $p > 0.05$), por lo que el color en esta tuna no cambió significativamente con la maduración.

Tabla 16. Color instrumental en el espacio CIEL*a*b* en la cara interna de cáscara de variedades de tuna (*Opuntia* spp.) del Altiplano Mexicano y del Valle de Teotihuacán.

Origen	Variedad	Cáscara Interior				
		L*	a*	b*	C*	h (°)
	Cristalina	58.58 ± 4.12 f	-7.53 ± 0.79 a	33.82 ± 3.56 efg	34.66 ± 3.50 de	99.89 ± 16.72 g
	Amarilla Montesa	40.53 ± 4.07 c	15.37 ± 5.65 d	32.58 ± 4.00 def	36.47 ± 3.86 ef	64.90 ± 9.17 e
	Amarilla Venado	49.60 ± 4.85 de	16.59 ± 3.71 d	46.83 ± 6.08 h	49.87 ± 5.66 h	70.25 ± 4.98 f
SLP	Cardona	25.58 ± 3.46 a	29.88 ± 3.93 gh	5.47 ± 1.56 a	30.40 ± 3.98 bc	10.36 ± 2.68 a
	Roja Pelona	28.51 ± 3.78 ab	30.70 ± 3.41 h	12.43 ± 2.31 b	33.17 ± 3.68 cd	22.00 ± 3.29 b
	"Naranjona"	40.20 ± 18.36 c	22.88 ± 4.24 e	26.65 ± 7.18 c	35.45 ± 6.76 def	48.75 ± 7.90 c
	Charola	29.51 ± 5.24 b	24.82 ± 3.74 f	3.64 ± 1.90 a	25.16 ± 3.71 a	8.46 ± 4.54 a
	Reyna 1	57.17 ± 4.11 f	-9.04 ± 0.98 a	35.55 ± 2.68 g	36.69 ± 2.64 ef	104.31 ± 1.62 h
	Reyna 2	64.16 ± 4.52 g	-7.29 ± 0.82 a	30.70 ± 3.81 d	31.58 ± 3.70 bc	103.54 ± 2.27 gh
Edomex	Pico Chulo	47.03 ± 3.62 d	13.49 ± 4.04 c	35.46 ± 3.93 g	38.16 ± 3.81 f	69.17 ± 6.36 f
	Roja San Martín	29.93 ± 4.93 b	28.87 ± 4.56 g	3.71 ± 2.08 a	29.19 ± 4.49 b	7.58 ± 4.28 a
	Amarillo Plátano	50.82 ± 4.59 e	12.01 ± 18.89 b	32.19 ± 5.12 de	36.36 ± 15.41 ef	72.49 ± 14.77 f
Tamps.	Amarilla Miquihuana	42.87 ± 6.03 c	24.91 ± 3.92 f	34.58 ± 7.16 fg	42.87 ± 6.68 g	53.80 ± 6.33 d

** Los resultados son valores promedio de 36 réplicas, por cada muestra evaluada.

*** Distintas letras indican diferencia estadísticamente significativa entre las muestras, $\alpha = 0.05$ ($p < 0.05$).

En el color de la pulpa de las variedades de tuna evaluadas (**Tabla 17**), la luminosidad de las muestras de tuna Reyna (1 y 2) no presentaron diferencias significativas entre sí ($p > 0.05$), teniendo incluso la luminosidad más alta ($p < 0.0001$) con respecto al resto de variedades analizadas. Como se ha observado con anterioridad, en las otras fracciones de la tuna (cáscara externa e interna), las tunas rojas presentaron menor luminosidad con respecto a las otras variedades de tuna. Por otro lado, en el parámetro a^* se determinó que las variedades rojas presentaron valores significativamente ($p < 0.0001$) mayores al resto de las tunas, mientras que las variedades Reyna (1 y 2) y Cristalina presentaron valores negativos (tonalidades verdes). En cuanto a la saturación del color, las variedades amarillas y naranjas presentaron la mayor saturación del color en pulpa, siendo las variedades más brillantes significativamente hablando ($p < 0.0001$) con respecto al resto de las variedades. Finalmente, con respecto al tono del color, de la misma manera, las variedades Reyna (1 y 2) y Cristalina no presentaron diferencias significativas ($p > 0.05$) entre sí, encontrándose en tonalidades amarillas-ver-

des; y las variedades Roja Pelona, Roja San Martín, Cardona y Charola en los valores mínimos de h, con tonalidades rojo fuertemente marcadas. Esto coincide con lo reportado por **Chavez-Santoscoy et al. (2009)** y **Gómez-Maqueo et al. (2020)**. Asimismo, en un estudio realizado por **Monroy-Gutiérrez et al. (2017)**, reportaron valores del tono del color (h) para las variedades Amarilla Montesa, Amarillo Plátano, Reyna, Cristalina y Rojo Pelón (Roja Pelona), siendo 1.076 veces, 1.008 veces, 0.938 veces (para ambas muestras), 0.976 veces, y 1.290 veces, respectivamente, lo encontrado en las mismas variedades de tuna, teniendo la Amarilla Montesa un tono ligeramente más anaranjado (rojizo), la variedad un tono ligeramente más verde, y la Roja Pelona una tonalidad ligeramente más rojiza a lo reportado por estos autores. Asimismo, se encontró concordancia en lo reportado por **Martín del Campo et al. (2019)** con lo encontrado en variedades verde-blancas de tuna evaluadas en el presente estudio, en todos los parámetros del color anteriormente mencionados.

Tabla 17. Color instrumental en el espacio CIEL*a*b* en la pulpa de variedades de tuna (*Opuntia* spp.) del Altiplano Mexicano y del Valle de Teotihuacán.

Origen	Variedad	L*	a*	Pulpa b*	C*	h (°)
SLP	Cristalina	55.90 ± 7.36 f	-4.18 ± 2.13 a	24.38 ± 5.92 c	24.76 ± 6.16 ab	99.19 ± 2.97 h
	Amarilla Montesa	48.03 ± 7.38 de	18.03 ± 3.25 d	40.63 ± 7.88 e	44.66 ± 7.33 e	65.53 ± 5.89 f
	Amarilla Venado	50.27 ± 8.67 e	13.64 ± 3.74 c	42.56 ± 9.20 e	44.93 ± 8.75 e	71.58 ± 6.83 g
	Cardona	26.13 ± 5.59 a	23.97 ± 6.64 f	3.92 ± 1.73 a	24.34 ± 6.67 ab	9.50 ± 3.79 b
	Roja Pelona	33.94 ± 6.18 b	27.64 ± 5.50 g	13.98 ± 4.83 b	31.16 ± 6.44 bc	26.38 ± 6.45 c
	"Naranjona"	46.00 ± 6.75 cd	17.49 ± 7.22 d	36.22 ± 7.29 de	40.77 ± 7.72 de	64.48 ± 9.53 ef
	Charola	24.47 ± 6.71 a	19.81 ± 6.24 de	1.25 ± 1.84 a	19.92 ± 6.26 a	3.04 ± 5.73 a
Edomex	Reyna 1	63.42 ± 4.02 g	-5.62 ± 3.13 a	29.66 ± 8.43 cd	30.25 ± 8.78 bc	99.85 ± 4.18 h
	Reyna 2	61.71 ± 6.33 g	-4.64 ± 2.30 a	25.05 ± 7.18 c	25.50 ± 7.43 abc	99.77 ± 3.30 h
	Pico Chulo	44.88 ± 6.79 cd	20.53 ± 5.17 e	32.20 ± 7.92 e	38.66 ± 7.24 e	56.85 ± 8.83 d
	Roja San Martín	31.34 ± 4.43 b	32.97 ± 4.29 h	6.43 ± 5.74 ab	34.05 ± 4.40 cd	10.93 ± 9.58 b
	Amarillo Plátano	53.49 ± 9.47 f	10.91 ± 3.59 b	32.03 ± 7.95 e	34.12 ± 7.48 de	70.75 ± 8.74 g
Tamps.	Amarilla Miquihuana	44.72 ± 7.94 c	19.73 ± 7.86 de	36.58 ± 8.61 de	42.57 ± 6.96 de	61.19 ± 13.13 e

** Los resultados son valores promedio de 36 réplicas, por cada muestra evaluada.

*** Distintas letras indican diferencia estadísticamente significativa entre las muestras, $\alpha = 0.05$ ($p < 0.05$).

Por otro lado, también se determinaron las diferencias generales en el color (ΔE^*_{ab}) entre las distintas muestras de tuna en cáscara externa (**Tabla 18**), cáscara interna (**Tabla 19**) y pulpa (**Tabla 20**), presentadas a continuación:

Para las diferencias generalizadas del color en la cáscara externa de las tunas (**Tabla 18**), aunque de manera general todas las variedades presentaron una diferencia superior a 0.5, aquellas que presentaron una menor diferencia fueron la Cristalina con la Reyna (1 y 2), siendo más parecida a la Reyna 1. Por otro lado, la variedad Amarilla Montesa presentó menor diferencia con la Amarilla Miquihuana y la Amarillo Plátano. Asimismo, la Amarilla Venado presentó una menor diferencia con la Amarillo Plátano, Reyna 1, Pico Chulo y Reyna 2. La Cardona presentó mayor similitud con la variedad Charola y ligeramente con la Roja San Martín. También, la Roja Pelona presentó menor diferencia con las variedades Amarilla Miquihuana, “Naranjona” y Charola. La tuna “Naranjona”, además de las anteriormente mencionadas, presentó una mayor similitud con la Amarilla Miquihuana. De manera similar, la variedad Charola presentó mayor similitud con la tuna Roja San Martín, además de las mencionadas anteriormente.

Tabla 18. Matriz de diferencias de ΔE^*_{ab} del color en la cáscara externa entre las variedades de tuna (*Opuntia* spp.) del Altiplano Mexicano y del Valle de Teotihuacán.

Muestra	Amarilla Montesa	Amarilla Venado	Cardona	Roja Pelona	“ Naranjona”	Charola	Reyna 1	Reyna 2	Pico Chulo	Roja San Martín	Amarillo Plátano	Amarilla Miquihuana
Cristalina	19.754	7.279	42.328	28.957	29.191	37.030	3.748	4.292	12.455	41.218	11.493	26.945
Amarilla Montesa		13.130	22.985	10.759	10.857	19.402	19.925	18.947	12.377	24.352	8.996	7.510
Amarilla Venado			35.312	21.806	22.235	29.867	6.841	8.529	7.953	34.497	5.511	20.242
Cardona				13.786	16.135	8.980	41.800	41.886	32.243	11.184	31.734	17.013
Roja Pelona					8.012	8.659	28.156	29.001	19.267	14.834	18.775	7.980
“ Naranjona”						13.977	28.895	28.552	22.350	21.409	17.864	4.875
Charola							35.852	37.402	26.656	8.775	27.268	15.438
Reyna 1								7.903	11.768	40.118	12.038	27.071
Reyna 2									13.604	41.610	10.788	25.911
Pico Chulo										29.500	10.170	19.600
Roja San Martín											32.450	21.376
Amarillo Plátano												15.655

Para las diferencias generalizadas del color en la cáscara interna de las tunas (**Tabla 19**), aunque de manera general todas las variedades presentaron una diferencia superior a 0.5, aquellas que presentaron una menor diferencia fueron la Cristalina con la Reyna (1 y 2), siendo más parecida a la Reyna 1. Por otro lado, la variedad Amarilla Montesa presentó menor diferencia generalizada en el color de la cáscara interna con la Pico Chulo y la “Naranja”. Asimismo, la Cardona presentó mayor similitud con la Roja San Martín, Charola y Roja Pelona (variedades de tuna roja). También, la Roja Pelona presentó menor diferencia con las variedades Roja San Martín. La tuna “Naranja”, además de las anteriormente mencionadas, presentó una mayor similitud con la Amarilla Miquihuana (al igual que en la cáscara exterior). De manera similar, la variedad Charola también presentó mayor similitud con la tuna Roja San Martín, además de las mencionadas anteriormente. Asimismo, la variedad Pico Chulo, en conjunto con las similitudes anteriormente observadas, también presentó una ligera diferencia generalizada del color con la tuna Amarillo Plátano.

Tabla 19. Matriz de diferencias de ΔE^*_{ab} del color en la cáscara interna entre las variedades de tuna (*Opuntia* spp.) del Altiplano Mexicano y del Valle de Teotihuacán.

Muestra	Amarilla Montesa	Amarilla Venado	Cardona	Roja Pelona	“ Naranjona”	Charola	Reyna 1	Reyna 2	Pico Chulo	Roja San Martín	Amarillo Plátano	Amarilla Miquihuana
Cristalina	29.180	28.840	57.375	53.134	36.249	52.935	2.691	6.401	24.038	55.245	21.089	36.055
Amarilla Montesa		16.932	34.197	28.031	9.579	32.380	29.682	32.790	7.354	33.591	10.825	10.032
Amarilla Venado			49.642	42.744	23.136	48.337	29.006	32.288	12.062	48.958	15.384	16.263
Cardona				7.603	26.669	6.658	58.453	59.215	40.353	4.799	40.870	34.227
Roja Pelona					19.996	10.625	54.172	55.209	34.200	9.028	35.178	27.027
“ Naranjona”						25.439	37.225	38.740	14.579	25.834	16.175	8.620
Charola							54.120	54.440	38.050	4.070	37.857	33.703
Reyna 1								8.688	24.700	56.499	22.238	36.850
Reyna 2									27.345	56.634	23.512	38.800
Pico Chulo										39.205	5.211	12.190
Roja San Martín											39.137	33.709
Amarillo Plátano												15.341

Para las diferencias generalizadas del color en la pulpa de las tunas (**Tabla 20**), siendo una de las fracciones de mayor importancia, aunque de manera general todas las variedades presentaron una diferencia superior a 0.5, aquellas que presentaron una menor diferencia fueron la Cristalina con la Reyna (1 y 2), presentando la Cristalina considerablemente más parecido con la Reyna 2. Por otro lado, la variedad Amarilla Montesa presentó menor diferencia generalizada en el color de la pulpa con la Pico Chulo, “Naranjona”, Amarilla Venado y Amarilla Miquihuana, así como con la Amarillo Plátano en menor medida. Además, la Amarilla Venado presentó mayor similitud con la Amarillo Plátano y, en menor medida, con las tunas “Naranjona” y Pico Chulo. Asimismo, la Cardona presentó mayor similitud con la Charola y, en menor magnitud, con la Roja San Martín. También, la Roja Pelona presentó menor diferencia con la variedad Roja San Martín. La tuna “Naranjona”, además de las anteriormente mencionadas, presentó una mayor similitud con la Amarilla Miquihuana (al igual que en las cáscaras exterior e interna), y con la Pico Chulo. De la misma forma, la variedad Reyna 1 presentó mayor similitud con la tuna Reyna 2, al igual que en las cáscaras externa e interna. Asimismo, la variedad Pico Chulo, en conjunto con las similitudes anteriormente observadas, también presentó una ligera diferencia generalizada del color con la tuna Amarilla Miquihuana.

Tabla 20. Matriz de diferencias de ΔE^*_{ab} del color en la pulpa entre las variedades de tuna (*Opuntia* spp.) del Altiplano Mexicano y del Valle de Teotihuacán.

Muestra	Amarilla Montesa	Amarilla Venado	Cardona	Roja Pelona	“ Naranjona”	Charola	Reyna 1	Reyna 2	Pico Chulo	Roja San Martín	Amarillo Plátano	Amarilla Miquihuana
Cristalina	28.627	26.073	45.793	40.030	26.608	45.804	9.304	5.873	30.795	48.014	21.908	29.079
Amarilla Montesa		5.294	43.156	31.636	4.891	45.927	30.278	30.729	4.314	40.884	8.990	5.504
Amarilla Venado			46.716	35.765	8.565	49.096	26.652	27.782	9.422	45.137	4.897	10.184
Cardona				13.255	38.464	5.220	54.115	50.310	39.988	10.698	47.180	37.813
Roja Pelona					27.249	17.698	47.123	43.994	28.279	9.606	36.640	26.252
“ Naranjona”						41.128	29.680	29.357	4.322	36.628	10.694	2.602
Charola							54.504	50.508	42.989	15.728	49.282	40.720
Reyna 1								5.013	33.417	55.297	21.919	32.255
Reyna 2									33.379	51.804	23.138	31.873
Pico Chulo										37.466	12.952	2.629
Roja San Martín											45.924	35.541
Amarillo Plátano												12.921

6.5. Textura instrumental

La dureza en cáscara se refiere a un indicativo del estado de maduración de los frutos, mientras que la dureza en pulpa que es directamente la fuerza máxima requerida para penetrar la pulpa. En la **Tabla 21** se muestran la dureza en cáscara y en pulpa de las variedades de tuna.

En cuanto a la dureza en cáscara, la primera variedad de tuna en evaluarse fue la Reyna 1, proviniendo de un cultivo joven (inicio de temporada), teniendo la mayor dureza de todas las muestras ($p < 0.05$), incluyendo la Reyna 2, siendo 1.43 veces mayor la muestra Reyna 1 que la Reyna 2. Esto coincide con lo mencionado por diversos autores (**Escobedo, 2012; Korićanac et al., 2020; Huang et al., 2022**) en cuanto al estado de maduración de los frutos no climatéricos, en cuanto mayor madurez presente un fruto, menor será la dureza de su cáscara. Asimismo, la variedad Cardona se trató de un fruto en estado de maduración elevado, por lo que su dureza en cáscara fue significativamente menor ($p < 0.05$) que la mayoría del resto de variedades de tuna. También, se pudo observar que las tunas originarias del Altiplano Mexicano, ya sea por las condiciones climáticas habituales o por la sequía que se dio en el 2022, mostraron una dureza, en promedio (1.893 N) menor que aquellas variedades provenientes del Valle de Teotihuacán (2.251 N).

Por otra parte, de manera general, la mayoría de las variedades de tuna presentaron valores de dureza en pulpa (fuerza de corte máxima) muy parecidos entre sí, sin diferencia significativa ($p > 0.05$). De esta forma, como se puede observar en la **Tabla 21**, el fruto Reyna de mayor madurez (Reyna 2) presentó la mayor dureza (111.03 N) de todas las variedades de tuna evaluadas. De la misma manera, esta tuna presentó una dureza significativamente ($p < 0.0001$) mayor a la Reyna 1. Sin embargo, esto no coincide con lo reportado por **Barbera et al. (1992)**, donde se observó una disminución de la firmeza de la pulpa (con comportamiento sigmoide) en tres variedades de tuna. Esto último pudo deberse al manejo postcosecha de los frutos, teniendo un mejor manejo de la Reyna 2. Asimismo, se puede ver que aquellos frutos provenientes del Valle de Teotihuacán presentaron una dureza en pulpa,

en promedio (83.36 N), mayor que aquellas variedades originarias del Altiplano Mexicano (65.82 N).

La variedad Cardona, uno de los frutos con mayor estado de maduración (como se mencionó en la **Sección 6.1**), presentó una dureza en pulpa intermedia. Sin embargo, dadas las sequías del presente año, muchas de las variedades de tuna analizadas no se desarrollaron en óptimas condiciones. Considerando esto, algo importante a notar es que la variedad Cardona, dado su estado de maduración (véase el **Anexo 8.6**), se pudieron determinar valores de dureza en pulpa relativamente altos debido a que se trató de un fruto muy pequeño, en donde se llegó a cuantificar parte de la dureza de las semillas gracias a la poca resistencia que presentó la pulpa. Asimismo, la variedad Charola fue aquella que presentó la menor dureza (34.20 N) de todas las variedades, junto con la tuna “Naranjona” (42.94 N).

Tabla 21. Evaluación instrumental de textura de variedades de tuna (*Opuntia* spp.) del Altiplano Mexicano y del Valle de Teotihuacán.

Origen	Variedad	Dureza Cáscara (N)	Fuerza de Corte Máxima (N)
	Cristalina	2.593 ± 1.119 ef	79.00 ± 22.18 c
	Amarilla Montesa	1.714 ± 0.398 bc	76.57 ± 31.28 bc
	Amarilla Venado	2.494 ± 0.789 f	81.79 ± 17.28 c
SLP	Cardona	1.243 ± 0.121 a	71.60 ± 27.38 bc
	Roja Pelona	2.112 ± 0.430 de	55.62 ± 11.75 ab
	"Naranjona"	1.737 ± 0.239 bc	42.94 ± 8.50 a
	Charola	1.610 ± 0.304 b	34.20 ± 13.52 a
	Reyna 1	3.172 ± 0.596 g	78.19 ± 17.74 c
	Reyna 2	2.213 ± 0.458 def	111.03 ± 8.18 d
Edomex	Pico Chulo	1.995 ± 0.574 cd	74.56 ± 7.53 bc
	Roja San Martín	1.399 ± 0.289 ab	68.48 ± 12.57 bc
	Amarillo Plátano	2.476 ± 0.653 f	84.54 ± 10.67 c
Tamps.	Amarilla Miquihuana	1.640 ± 0.304 b	84.83 ± 17.59 c

* Los resultados son valores promedio de 18 réplicas para dureza en cáscara y 5 réplicas para dureza en pulpa por cada muestra evaluada.

** Distintas letras indican diferencia estadísticamente significativa entre las muestras, $\alpha = 0.05$ ($p < 0.05$).

6.6. Análisis sensorial

6.6.1. Generación de atributos

Tomando en cuenta las 13 muestras de tuna evaluadas, se generaron 61 atributos en total, siendo mayor el número de atributos para definir el sabor (23) y el olor (17), seguidos de la textura (11), la apariencia (7) y el resabio (3). Esto coincide con lo mencionado por **Dairou & Sieffermann (2002)** y **Ayala (2016)** para la metodología del FP donde, para una adecuada descripción de cierto producto o muestra, se requiere utilizar una gran cantidad de atributos. Asimismo, se encontraron algunos de los atributos definidos por el panel (tuna, frutal, pepino, fresco y nota verde) que también fueron reportados por **Torres-Bojórquez et al. (2017)**.

El panel entrenado utilizó un lenguaje común sin el empleo de vocabulario demasiado técnico para definir las muestras, con su posterior definición de terminología. Después de las sesiones de revisión de los términos, se seleccionaron por consenso los atributos que formarían parte del perfil sensorial de las tunas, mismos que se muestran en la **Tabla 22**. Cabe resaltar que no todos los atributos evaluados se presentaron en todas las muestras de tuna.

Tabla 22. Atributos sensoriales generados para variedades de tuna (*Opuntia* spp.) del Altiplano Mexicano y del Valle de Teotihuacán.

Aspecto	Atributos			
	Olor	Textura	Sabor	Resabio
1) Color	8) Nota verde	25) Dureza	36) Dulce	59) Astringente
2) Superficie	9) Dulce	26) Cohesividad	37) Ácido	60) Amargo
3) Brillo	10) Ácido	27) Jugosidad	38) Fermentado	61) Metálico
4) Homogeneidad	11) Fermentado	28) Crujiente	39) Amargo	
5) Color de semillas	12) Frutal	29) Viscosidad	40) Salado	
6) Tamaño de semillas	13) Manzana	30) Consistencia babosa	41) Cítrico	
7) Cantidad de semillas	14) Cítrico	31) Fibrosidad	42) Miel	
	15) Pepino	32) Granulosidad	43) Frutal	
	16) Jitomate	33) Aterciopelada	44) Frutos rojos	
	17) Sandía	34) Masticabilidad	45) Pera	
	18) Melón	35) Adhesividad	46) Melón	
	19) Piña		47) Sandía	
	20) Papaya		48) Piña	
	21) Nopal		49) Papaya	
	22) Floral		50) Manzana	
	23) Intensidad de olor a tuna		51) Pepino	
	24) Fresco		52) Jitomate	
			53) Ciruela	
			54) Nopal	
			55) Intensidad de sabor a tuna	
			56) Floral	
			57) Nota verde	
			58) Fresco	

6.6.2. Perfil sensorial

Para el perfil de cada tuna, los atributos sensoriales fueron evaluados en determinadas escalas (estructuradas) de evaluación (**Anexo 7**). En el caso de los atributos de olor (acercando la muestra a 3 cm de la nariz y percibiendo los olores que desprende) y sabor (mordiéndola la muestra y prestando atención a las notas de sabor percibidas y su intensidad), todos estos se evaluaron de suave (0) a intenso (9), mientras que para los atributos de resabio (sensación de pesadez o sequedad que deja en la boca, así como gusto amargo o sabor metálico percibido en garganta) se evaluó de poco (0) a mucho (9). A continuación, se muestran las escalas (así como la forma de evaluación) que se utilizaron para cada uno de los atributos de apariencia (**Tabla 23**) y textura (**Tabla 24**).

Tabla 23. Escalas de evaluación utilizada para los atributos de apariencia en pulpa de tuna (*Opuntia* spp.) del Altiplano Mexicano y del Valle de Teotihuacán.

Atributos	Escala		Forma de Evaluación
	Mínimo (0)	Máximo (9)	
Color*	Verde claro Amarillo Amarillo Naranja Naranja Rosa Rojo	Verde oscuro Rojizo/Rojo Naranja Rojo Granate Granate Granate	Intensidad del color en la pulpa de la muestra.
Superficie	Lisa	Rugosa	Observando la muestra sobre el plato: Percepción visual de elementos macrogeométricos que determinan la textura superficial (e.g. patrones y formas).
Brillo	Opaco	Brillante	Cantidad de luz reflejada por la muestra.
Homogeneidad	Homogéneo	Heterogéneo	Homogeneidad de color en la tuna
Color de semillas	Café	Negro	Intensidad del color en las semillas de la muestra.
Tamaño de semillas	Pequeña	Grande	Tamaño general de las semillas dentro de la muestra en un bocado.
Cantidad de semillas	Poca	Mucha	Cantidad de semillas dentro de la muestra en un bocado

* Dependiendo de la variedad de tuna.

Tabla 24. Escalas de evaluación utilizada para los atributos de textura en pulpa de tuna (*Opuntia* spp.) del Altiplano Mexicano y del Valle de Teotihuacán.

Atributos	Escala		Forma de Evaluación
	Mínimo (0)	Máximo (9)	
Crujiente	Poco	Mucho	Escuche el sonido que produce la muestra cuando la empieza a masticar.
Dureza	Suave	Duro	Ponga la muestra entre sus dientes incisivos y muerda, la fuerza requerida para penetrar la muestra es la dureza.
Cohesividad	Suelta	Compacta	Al morder la muestra, qué tan compacta se percibe esta.
Jugosidad	Seco	Jugoso	Observe la cantidad de líquido que desprendió la muestra cuando la mordió para evaluar la dureza, esa sensación es la jugosidad.
Viscosidad	Baja	Alta	Es el cuerpo que tiene el jugo de la muestra.
Consistencia babosa	Poca	Mucha	Tome un pedacito de muestra entre dos dedos y vea la sensación de pegajosidad en la mano.
Fibrosidad	Poca	Mucha	Es la cantidad de fibras que se perciben en la boca al masticar la muestra.
Granulosidad	Baja	Alta	Note la cantidad de partículas y semillas que presenta la muestra después de 3 mordidas.
Aterciopelada	Poco	Mucho	Sensación suave y cremosa en la boca.
Masticabilidad	Baja	Alta	Cuente la cantidad de veces que tiene que masticar la muestra para poderla deglutir, si la mastica 5 veces el valor será 4 en la escala.
Adhesividad	Poca	Mucha	Note la cantidad de muestra que se queda adherida a dientes y paladar durante la masticación

* La presencia de estos atributos en el perfil dependió de la variedad de tuna.

6.6.2.1. Análisis completo

6.6.2.1.1. Apariencia y textura

Como se puede observar en la **Figura 28**, la cual corresponde al PCA proveniente de un GPA, para los atributos de apariencia y textura en tunas tanto del Valle de Teotihuacán (Reyna 1, Reyna 2, Pico Chulo, Roja San Martín y Amarillo Plátano) como del Altiplano Mexicano (Cristalina, Amarilla Montesa, Amarilla Venado, Cardona, Roja Pelona, “Naranja”, Charola y Amarilla Miquihuana); con los componentes 1 (F1) y 2 (F2) se explica el 22.72 y 19.69 % de la variabilidad entre muestras, respectivamente, con un 42.41 % entre ambos componentes.

Correlacionados positivamente con ambos componentes (cuadrante I), se encuentran las tunas Reyna 1 y Reyna 2. Estas muestras se pueden caracterizar por su masticabilidad, jugosidad, granulosidad y dureza.

En la **Figura 29**, la cual corresponde al consenso de evaluación de los jueces, para los atributos de apariencia y textura, se puede ver que, debido al entrenamiento de los jueces, las muestras fueron evaluadas de forma homogénea, permitiendo esto discriminar entre muestras. Esto lo observamos en las muestras Pico Chulo, Amarilla Montesa, “Naranjona”, Amarillo Plátano, y Amarilla Miquihuana, aunque muy cercanas entre sí, se encuentran agrupadas por separado, como se puede observar por el consenso. Una observación más es que las tunas Reyna 1 y Reyna 2, a pesar de ser similares, los jueces sí las discriminan entre sí.

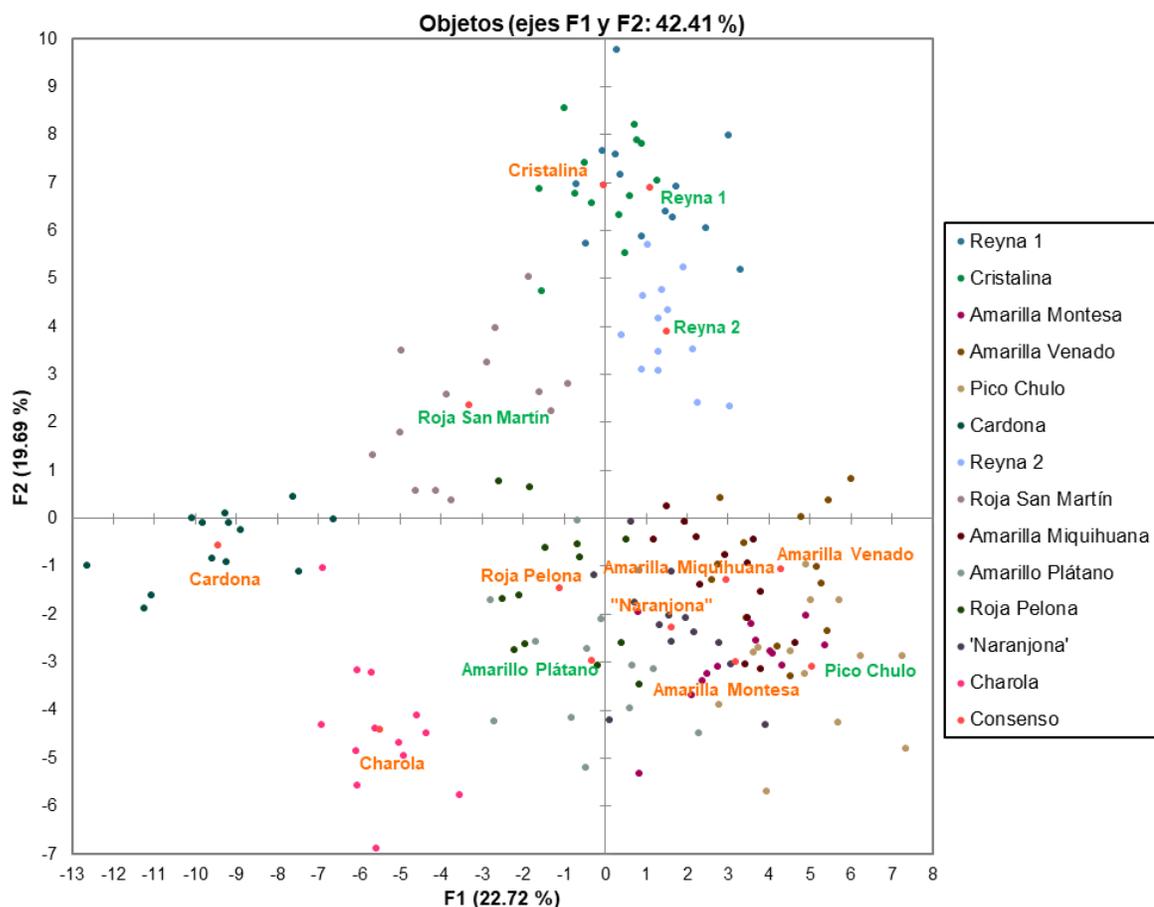


Figura 29. Correlación entre las dimensiones de la configuración del consenso inicial de los jueces y las variedades de tuna (*Opuntia* spp.) provenientes del Valle de Teotihuacán (Reyna 1, Reyna 2, Pico Chulo, Roja San Martín, Amarillo Plátano; ●) y del Altiplano Mexicano (Cristalina, Amarilla Montesa, Amarilla Venado, Cardona, Roja Pelona, “Naranjona”, Charola, Amarilla Miquihuana; ●) para los atributos de apariencia y textura.

De manera general, las características sensoriales de las tunas (por medio de estudios analíticos) han sido poco estudiadas (Valero-Galván *et al.*, 2021). Se encontró cierta concordancia entre lo determinado en el presente estudio con lo reportado por diversos autores (Torres-Bojórquez *et al.*, 2017; Valero-Galván *et al.*, 2021), donde se encontraron atributos en apariencia de tuna como color (intensidad), brillo, y en su textura como jugosidad y dureza. Sin embargo, se encontró que las tunas verde-amarillo-anaranjadas (del presente estudio) fueron las que presentaron un mayor brillo, en comparación de las tunas rojas, opuesto a lo reportado por Valero-Galván *et al.* (2021) en tuna *O. ficus-indica* (variedades roja y verde).

6.6.2.1.2. Olor, sabor y resabio

Por otra parte, la **Figura 30** corresponde al PCA proveniente de un GPA para los atributos de olor, sabor y resabio, donde los componentes F1 y F2 explican el 19.79 y 17.86 %, respectivamente, para explicar el 37.65 % (entre ambos componentes) de la variabilidad total de estos atributos entre muestras.

Como se puede observar en el cuadrante I, se encuentran correlacionadas las tunas Roja Pelona y Charola, caracterizadas por su olor a melón, floral, sandía, manzana y fresco; también por su sabor a frutos rojos, manzana, miel, sandía, floral, ciruela, fresco, y papaya; y por su resabio metálico.

En correlación positiva con F1 y negativa con F2 se encuentran correlacionadas las tunas “Naranjona”, Reyna 1 y Reyna 2, caracterizadas por los sabores a melón, cítrico, dulce, y olores a papaya, cítrico y dulce.

En el cuadrante III, se encuentran correlacionadas las tunas Amarilla Montesa, Cristalina, Amarilla Venado, Roja San Martín y Pico Chulo. Estas muestras están correlacionadas

con sabor pepino, frutal, nopal, intensidad de sabor a tuna, fermentado, nota verde y piña; resabio amargo; y por su olor frutal, nota verde, y piña.

Finalmente, en el cuadrante IV se encuentran las tunas Amarillo Plátano, Cardona y Amarilla Miquihuana. Estas tunas se pueden caracterizar principalmente por su intensidad de olor a tuna, olor a nopal, ácido, pepino, jitomate y fermentado; por su sabor salado, ácido, pera, jitomate, y amargo; y por su resabio astringente.

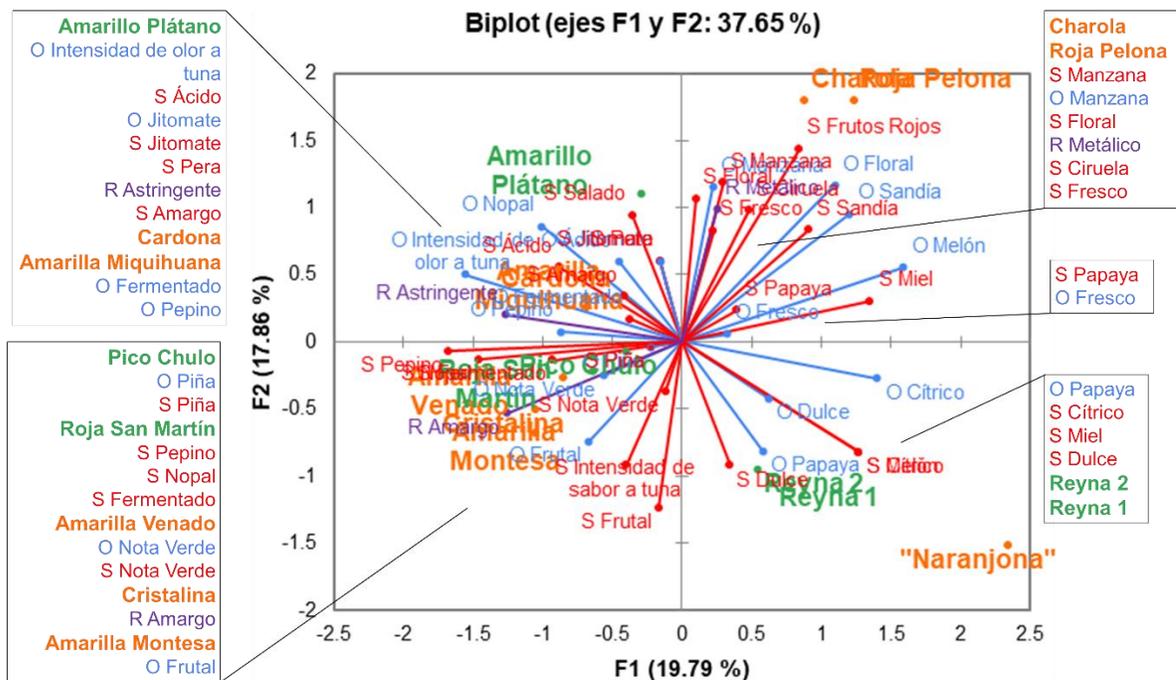


Figura 30. PCA de atributos de Olor (●), Sabor (●) y Resabio (●) de las variedades de tuna (*Opuntia* spp.) provenientes del Valle de Teotihuacán (Reyna 1, Reyna 2, Pico Chulo, Roja San Martín, Amarillo Plátano; ●) y del Altiplano Mexicano (Cristalina, Amarilla Montesa, Amarilla Venado, Cardona, Roja Pelona, “Naranjona”, Charola, Amarilla Miquihuana; ●), obtenido por GPA.

Asimismo, en la **Figura 31**, la cual corresponde al consenso de los jueces para los atributos de olor, sabor y resabio, en ella se puede observar que en estos atributos hay una mayor similitud entre las muestras, sin embargo, los jueces las logran discriminar.

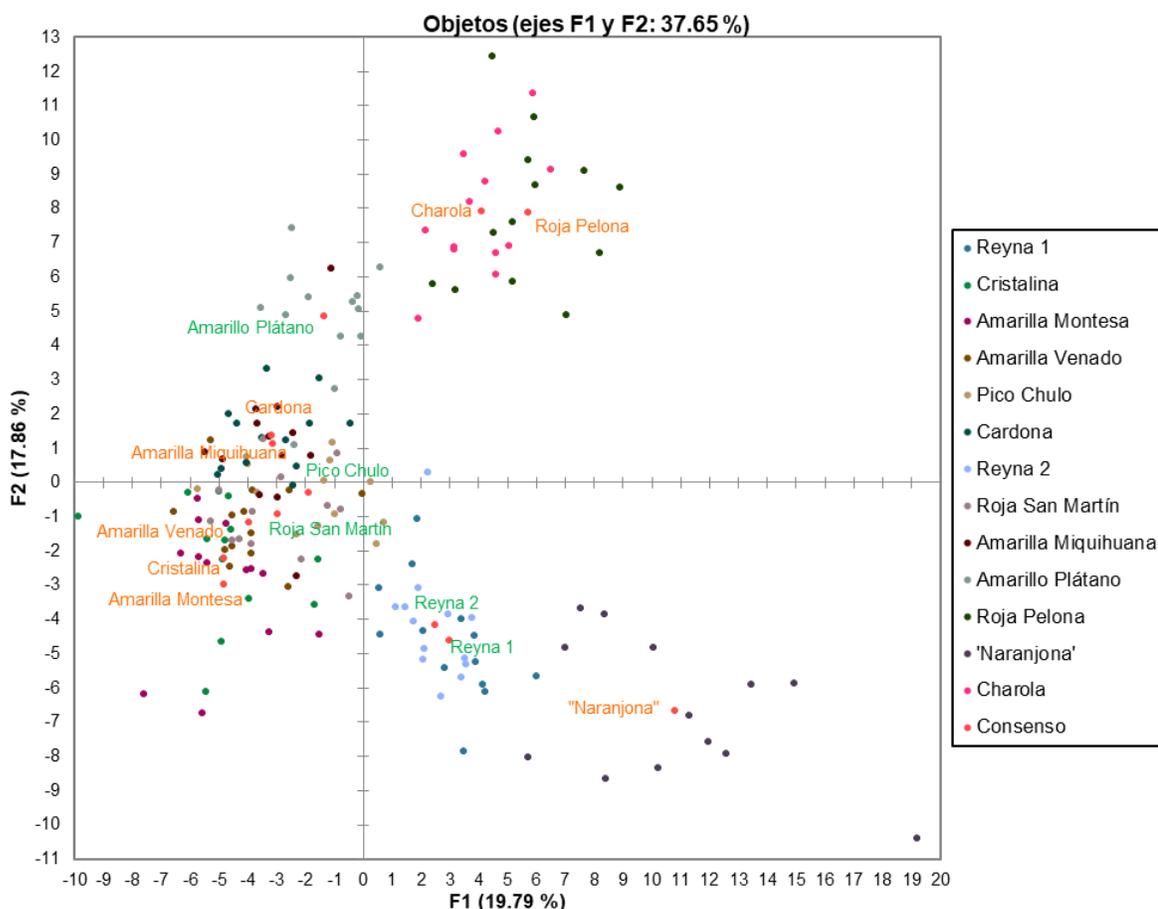


Figura 31. Correlación entre las dimensiones de la configuración del consenso inicial de los jueces y las variedades de tuna (*Opuntia* spp.) provenientes del Valle de Teotihuacán (Reyna 1, Reyna 2, Pico Chulo, Roja San Martín, Amarillo Plátano; ●) y del Altiplano Mexicano (Cristalina, Amarilla Montesa, Amarilla Venado, Cardona, Roja Pelona, "Naranjona", Charola, Amarilla Miquihuana; ●) para los atributos de olor, sabor y resabio.

Así como en los atributos de apariencia y textura, se encontró cierta concordancia entre lo determinado en el presente estudio con lo reportado por diversos autores (Torres-Bojórquez *et al.*, 2017; Valero-Galván *et al.*, 2021), donde se encontraron atributos en tuna como olor floral, fresco, vegetal (nota verde), dulce, frutal, herbal, y ácido, y sabor a pepino, vegetal, tuna, dulce, amargo y ácido, así como astringencia. Asimismo, las diferencias en la intensidad y presencia de ciertos atributos tanto de olor como de sabor en tuna están relacionados con la composición de compuestos volátiles, la cual depende, entre muchos otros factores, de la especie, variedad, condiciones climáticas de cultivo, el cultivar, estado de maduración del fruto, y manejo postcosecha (como condiciones de almacenamiento) (Valero-Galván *et al.*, 2021). Así, las notas de olor/ sabor frutales, florales, dulces y ácidas características

de las distintas variedades de tuna pueden resultar agradables al olfato y paladar, pudiendo ser compatibles con diversos alimentos (Torres-Bojórquez *et al.*, 2017).

6.6.2.2. Análisis por región de origen

6.6.2.2.1. Valle de Teotihuacán

6.6.2.2.1.1. Apariencia y textura

Analizando las muestras por región de origen, la cual corresponde al PCA proveniente de un GPA (Figura 32), para los atributos de apariencia y textura en tuna proveniente del Valle de Teotihuacán (Reyna 1, Reyna 2, Pico Chulo, Roja San Martín y Amarillo Plátano); donde F1 y F2 explican el 36.11 y 31.71 % de la variabilidad entre muestras, respectivamente, explicando el 67.83 % entre ambos componentes de la variabilidad total de estos atributos en las muestras.

Correlacionada positivamente con ambos componentes (cuadrante I), se encuentra la tuna Pico Chulo. Esta muestra se puede caracterizar por cohesividad, fibrosidad y granulosis (textura), así como por su apariencia en tamaño de semillas.

Correlacionada positivamente con F1 y negativamente con F2 (cuadrante II), se encuentra la tuna Amarillo Plátano. Esta última se caracteriza por su dureza, jugosidad, crujiente, aterciopelada, consistencia babosa, y masticabilidad (textura), y su aspecto en heterogeneidad.

En el cuadrante III (correlación negativa con ambos componentes) se encuentran correlacionadas las tunas Reyna (1 y 2), las cuales se pueden caracterizar por su cantidad de semillas.

La muestra que se correlaciona negativamente con F1 y positivamente con F2 (cuadrante IV) es la tuna Roja San Martín, la cual se caracteriza por su color de semillas, color (de pulpa), brillo y superficie rugosa (apariciencia), y por su viscosidad y adhesividad (textura).

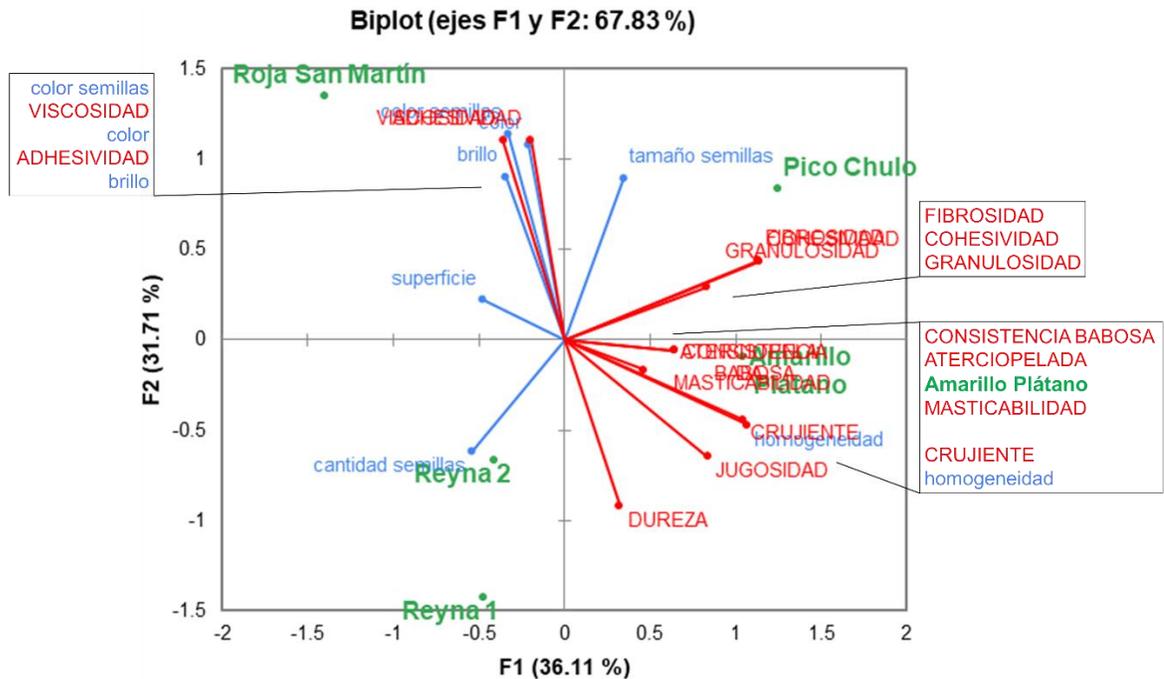


Figura 32. PCA de atributos de aspecto (●) y Textura (●) de las variedades de tuna (*Opuntia* spp.) provenientes del Valle de Teotihuacán (Reyna 1, Reyna 2, Pico Chulo, Roja San Martín, Amarillo Plátano; ●), obtenido por GPA.

Asimismo, en la **Figura 33**, la cual corresponde al consenso de la evaluación de los jueces, se puede observar que los jueces presentaron consenso en la evaluación y que en muestras semejantes como la Reyna 1 y 2 fueron capaces de diferenciarlas.

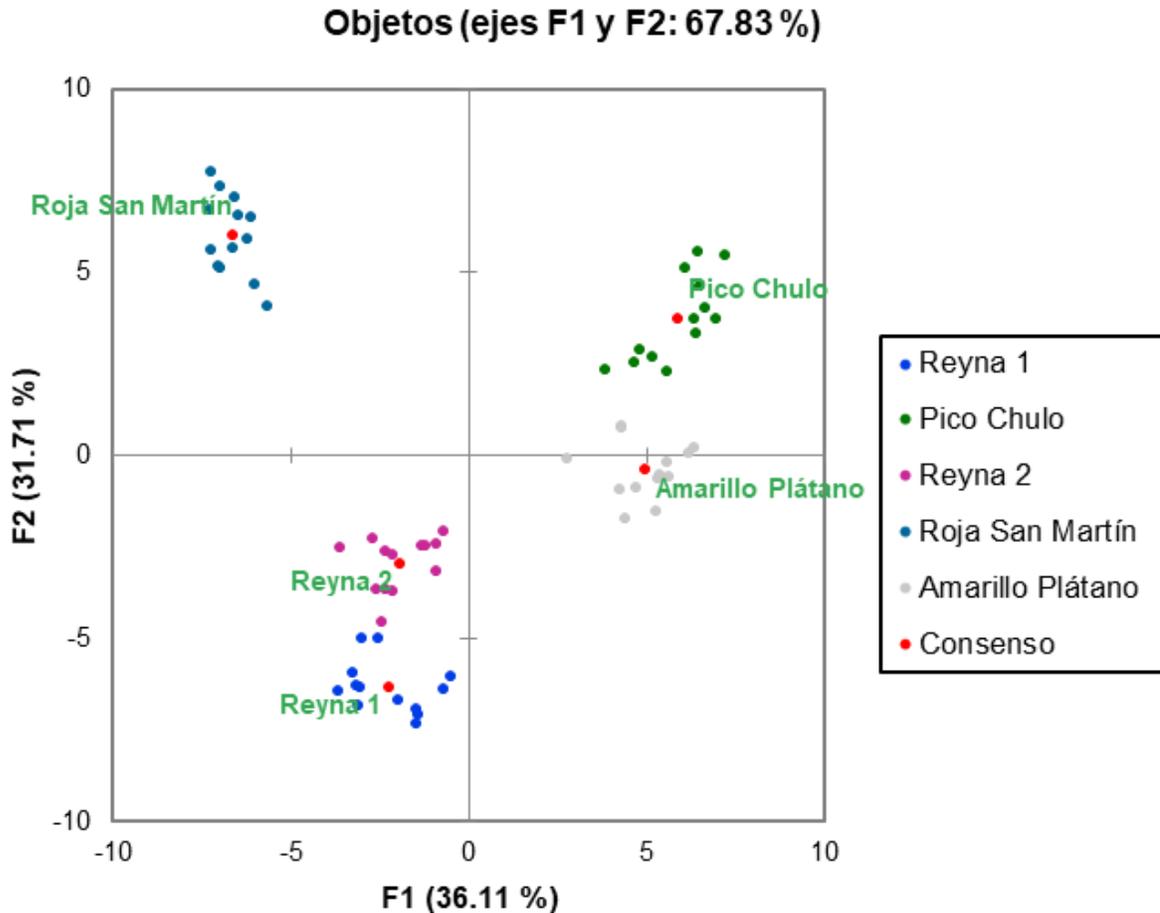


Figura 33. Correlación entre las dimensiones de la configuración del consenso inicial de los jueces y las variedades de tuna (*Opuntia* spp.) provenientes del Valle de Teotihuacán (Reyna 1, Reyna 2, Pico Chulo, Roja San Martín, Amarillo Plátano; ●) para los atributos de apariencia y textura.

6.6.2.2.1.2. Olor, sabor y resabio

Como se puede observar en la **Figura 34**, la cual corresponde al PCA proveniente de un GPA, para los atributos de olor, sabor y resabio en tuna proveniente del Valle de Teotihuacán (Reyna 1, Reyna 2, Pico Chulo, Roja San Martín y Amarillo Plátano); F1 y F2 explican el 39.80 y 27.86 % de la variabilidad entre muestras, respectivamente, explicando el 67.66 % entre ambos componentes de la variabilidad total de estos atributos en las muestras.

Correlacionado con el componente 1, se observó que la variedad Reyna (1 y 2) fue diferente a las variedades Pico Chulo, Roja San Martín y Amarillo Plátano.

De forma positiva a F1, las tunas Roja San Martín, Amarillo Plátano y Pico Chulo se caracterizaron por su sabor a sandía, salado, jitomate, pera, papaya, amargo, pepino, ácido, nopal, floral y piña, olor a jitomate, manzana, ácido, nopal, intensidad de olor a tuna, pepino, sandía, piña, y papaya, y resabio metálico y astringente, siendo el sabor amargo, pepino, ácido y nopal los descriptores más perceptibles en las variedades Roja San Martín y Pico Chulo. Mientras que en la Amarillo Plátano fueron el sabor a sandía, manzana, pera, jitomate, salado y papaya, olor a jitomate, manzana y pepino, y resabio metálico.

De manera negativa a F1, la tuna Reyna (1 y 2) se caracterizaron por su sabor a nota verde, dulce, tuna (intensidad), frutal, olor fresco, nota verde, cítrico, dulce, frutal, y resabio amargo, siendo su sabor a nota verde, dulce e intensidad de sabor a tuna, y olor a nota verde, fresco y cítrico los descriptores más perceptibles.

Correlacionado con F2, se observó que las tunas Roja San Martín y Pico Chulo fueron distintas a la Reyna (1 y 2) y a la Amarillo Plátano.

Así, correlacionadas de forma positiva con F2, la Roja San Martín y Pico Chulo se caracterizaron por su resabio amargo, por su sabor amargo, frutal, pepino, ácido, nopal, floral y piña, y por su olor a nopal, intensidad de olor a tuna, ácido, dulce, frutal, piña, sandía y papaya, siendo el sabor amargo, pepino, ácido, nopal, floral y piña, así como olor a nopal, intensidad de olor a tuna, ácido, piña, sandía y papaya los descriptores más perceptibles en estas variedades.

De manera negativa con F2, las tunas Reyna (1 y 2) y Amarillo Plátano se caracterizaron por su sabor a sandía, nota verde, intensidad de sabor a tuna, pera, jitomate, papaya, manzana y salado, olor fresco, nota verde, cítrico, manzana, jitomate y pepino, así como por su resabio metálico, siendo su sabor a sandía, jitomate, pera, salado, manzana y papaya, olor a pepino,

manzana y jitomate, y resabio metálico los descriptores más perceptibles en la variedad Amarillo Plátano, mientras que en la tuna Reyna (1 y 2), los descriptores más perceptibles fueron su olor fresco, nota verde y cítrico, y su sabor a nota verde, dulce y intensidad de sabor a tuna.

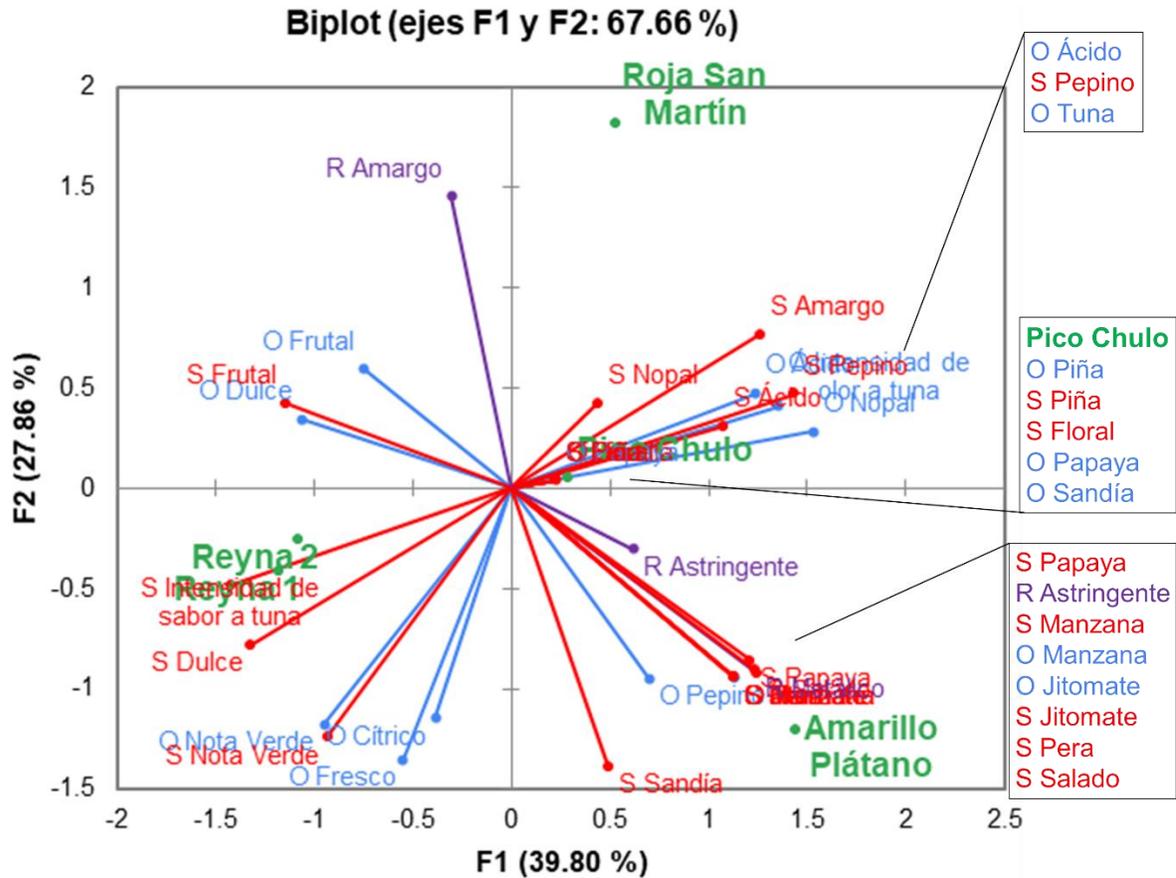


Figura 34. PCA de atributos de Olor (●), Sabor (●) y Resabio (●) de las variedades de tuna (*Opuntia* spp.) provenientes del Valle de Teotihuacán (Reyna 1, Reyna 2, Pico Chulo, Roja San Martín, Amarillo Plátano; ●), obtenido por GPA.

Asimismo, en la **Figura 35**, la cual corresponde al consenso de evaluación de los jueces, los cuales discriminaron bien las muestras, no encontrándose diferencias claras entre las muestras de tuna Reyna 1 y 2.

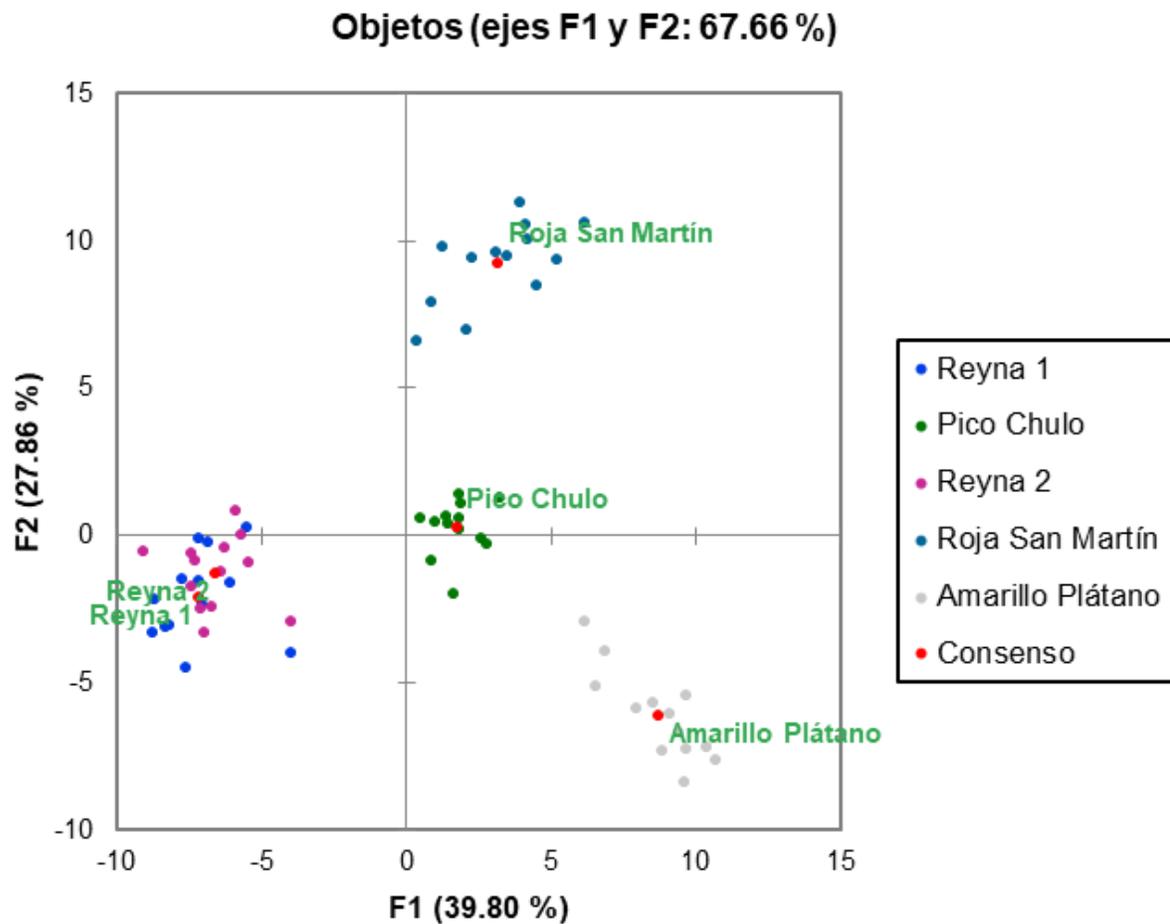


Figura 35. Correlación entre las dimensiones de la configuración del consenso inicial de los jueces y las variedades de tuna (*Opuntia* spp.) provenientes del Valle de Teotihuacán (Reyna 1, Reyna 2, Pico Chulo, Roja San Martín, Amarillo Plátano; ●) para los atributos de de olor, sabor y resabio.

6.6.2.2.2. Altiplano Mexicano

6.6.2.2.2.1. Apariencia y textura

Como se puede observar en la **Figura 36**, la cual corresponde al PCA proveniente de un GPA, para los atributos de apariencia y textura en tuna originaria del Altiplano Mexicano (Cristalina, Amarilla Montesa, Amarilla Venado, Cardona, Roja Pelona, “Naranjona”, Charola y Amarilla Miquihuana); F1 y F2 explican el 30.49 y 22.55 % de la variabilidad entre muestras, respectivamente, explicando el 53.04 % entre ambos componentes de la variabilidad total de estos atributos en las muestras.

Correlacionada positivamente con ambos componentes (cuadrante I), se encuentra la tuna Charola, la cual se puede caracterizar por su apariencia en tamaño de semillas y color (de pulpa), así como por su textura aterciopelada y consistencia babosa.

Correlacionada positivamente con F1 y negativamente con F2 (cuadrante II), se encuentra la tuna Cardona. Esta última se caracteriza por su viscosidad (textura), y su aspecto en superficie (rugosa) y cantidad de semillas.

En el cuadrante III (correlación negativa con ambos componentes) se encuentran correlacionadas las tunas Cristalina, Amarilla Venado y Amarilla Miquihuana, las cuales se pueden caracterizar por su granulosidad, jugosidad, masticabilidad, adhesividad y fibrosidad (textura), así como por su aspecto en brillo y heterogeneidad.

Las muestras que se correlacionan negativamente con F1 y positivamente con F2 (cuadrante IV) son las tunas “Naranjona”, Amarilla Montesa y Roja Pelona, las cuales se caracterizan por su textura cohesiva, crujiente y dura, así como por su aspecto en color de semillas.

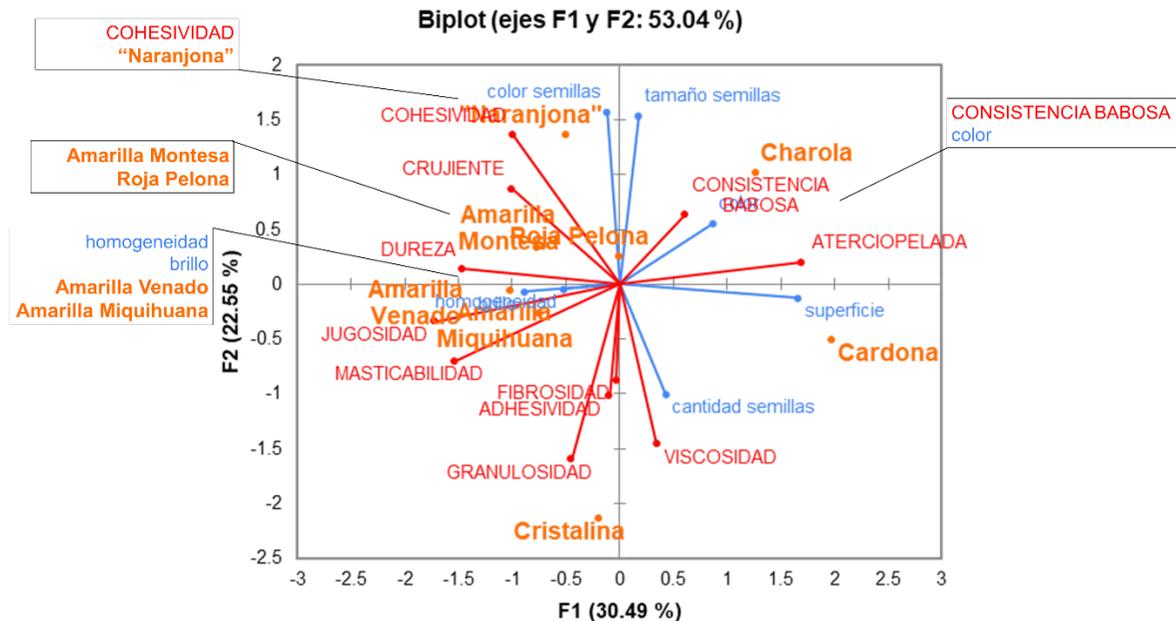


Figura 36. PCA de atributos de Aspecto (●) y Textura (●) de las variedades de tuna (*Opuntia* spp.) originarias del Altiplano Mexicano (Cristalina, Amarilla Montesa, Amarilla Venado, Cardona, Roja Pelona, "Naranjona", Charola, Amarilla Miquihuana; ●), obtenido por GPA.

Asimismo, en la **Figura 37**, la cual muestra el consenso de los jueces, se puede ver que algunas de estas se encontraron similares entre sí (Amarilla Venado, Amarilla Montesa, Amarilla Miquihuana y Roja Pelona), traslapándose ligeramente entre sí; mientras que el resto (Cristalina, Cardona, "Naranjona" y Charola) se encontraron las evaluaciones bien definidas, lo cual puede confirmar en el consenso entre los jueces.

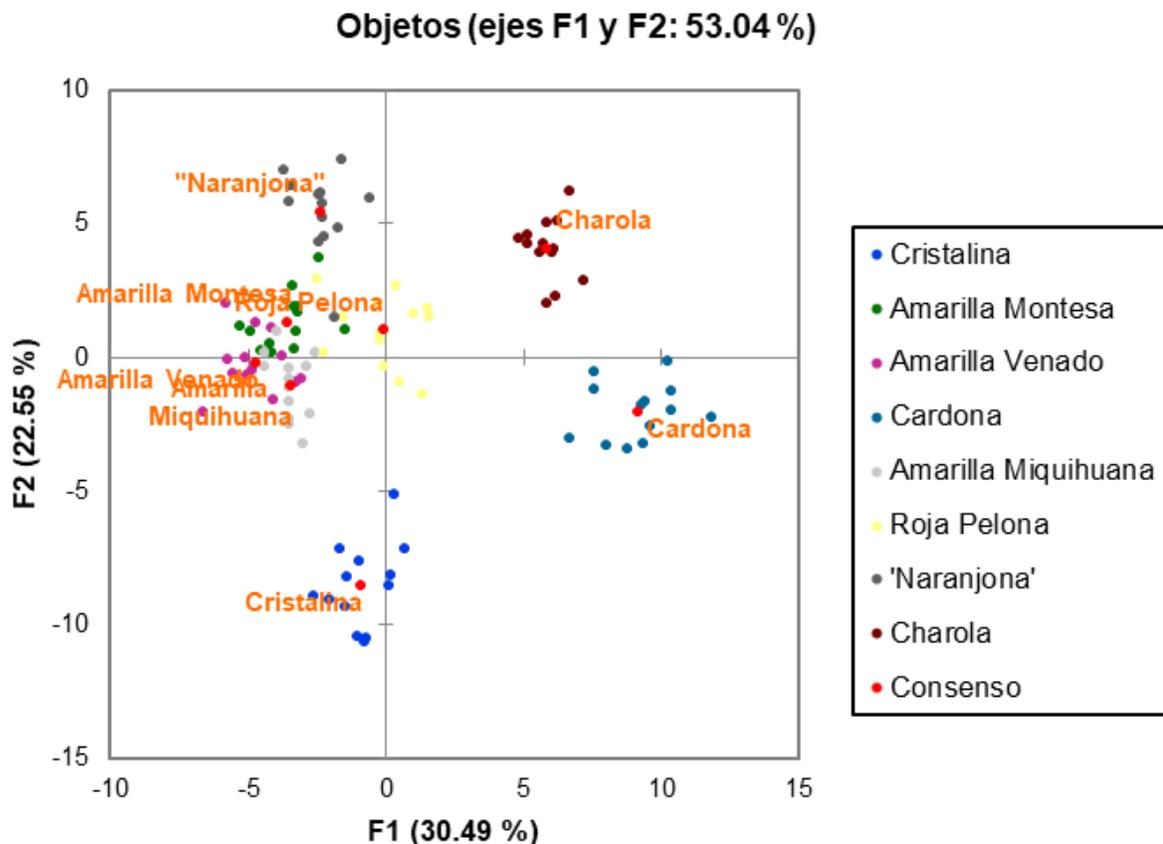


Figura 37. Correlación entre las dimensiones de la configuración del consenso inicial de los jueces y las variedades de tuna (*Opuntia* spp.) originarias del Altiplano Mexicano (Cristalina, Amarilla Montesa, Amarilla Venado, Cardona, Roja Pelona, “Naranjona”, Charola, Amarilla Miquihuana; ●) para los atributos de apariencia y textura.

6.6.2.2.2. Olor, sabor y resabio

Por otra parte, la **Figura 38** corresponde al PCA proveniente de un GPA para los atributos de olor, sabor y resabio en tuna originaria del Altiplano Mexicano (Cristalina, Amarilla Montesa, Amarilla Venado, Cardona, Roja Pelona, “Naranjona”, Charola y Amarilla Miquihuana), donde los componentes F1 y F2 explican el 29.43 y 24.18 %, respectivamente, para explicar el 53.61 % (entre ambos componentes) de la variabilidad total de estos atributos entre muestras.

Como se puede observar en el cuadrante I, se encuentra correlacionada la tuna “Naranjona”, caracterizada por su sabor a melón, cítrico, papaya y amargo, así como por su olor a papaya, cítrico y dulce.

En correlación positiva con F1 y negativa en F2 (cuadrante II) se encuentran las variedades Roja Pelona y Charola, caracterizadas por sabores a frutos rojos, floral, fresco, manzana, ciruela, sandía y miel, así como por notas de olor floral, sandía, melón y manzana, y por un resabio metálico.

En el cuadrante III, se encuentran correlacionadas las tunas Amarilla Miquihuana y Cardona. Estas muestras están correlacionadas con notas de olor a intensidad de olor a tuna, nopal, nota verde, fresco y fermentado, con notas de sabor a nopal, nota verde, ácido y salado, así como con un resabio astringente.

Finalmente, en correlación negativa con F1 y positiva con F2 se encuentran las tunas Amarilla Montesa, Cristalina y Amarilla Venado. Estas tunas se pueden caracterizar principalmente por sabor a pepino, frutal, intensidad de sabor a tuna, fermentado y dulce, por un resabio amargo, y por su olor frutal, pepino y ácido.

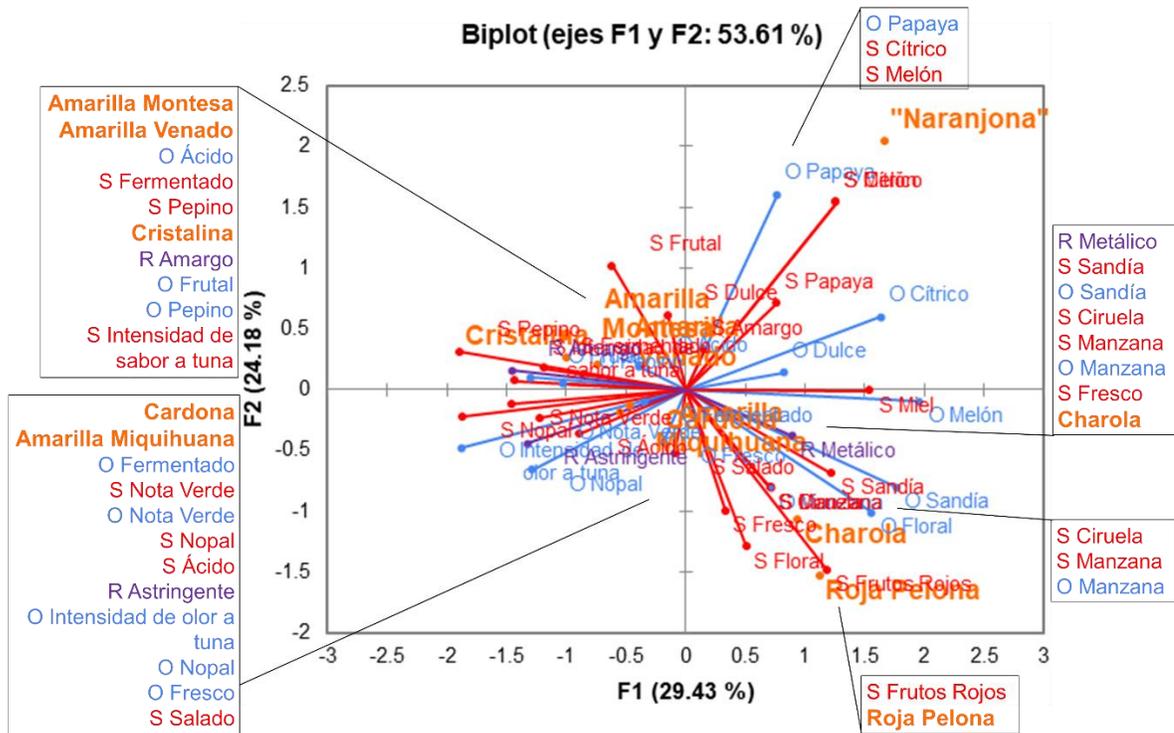


Figura 38. PCA de atributos de Olor (●), Sabor (●) y Resabio (●) de las variedades de tuna (*Opuntia* spp.) originaria del Altiplano Mexicano (Cristalina, Amarilla Montesa, Amarilla Venado, Cardona, Roja Pelona, “Naranjona”, Charola, Amarilla Miquihuana; ●), obtenido por GPA.

Asimismo, en la **Figura 39** se muestra el consenso de evaluación de las diferentes tunas evaluadas, en ella se observa que, a pesar de tener muestras semejantes en los atributos de olor, sabor y resabio, los jueces presentaron consenso en sus evaluaciones.

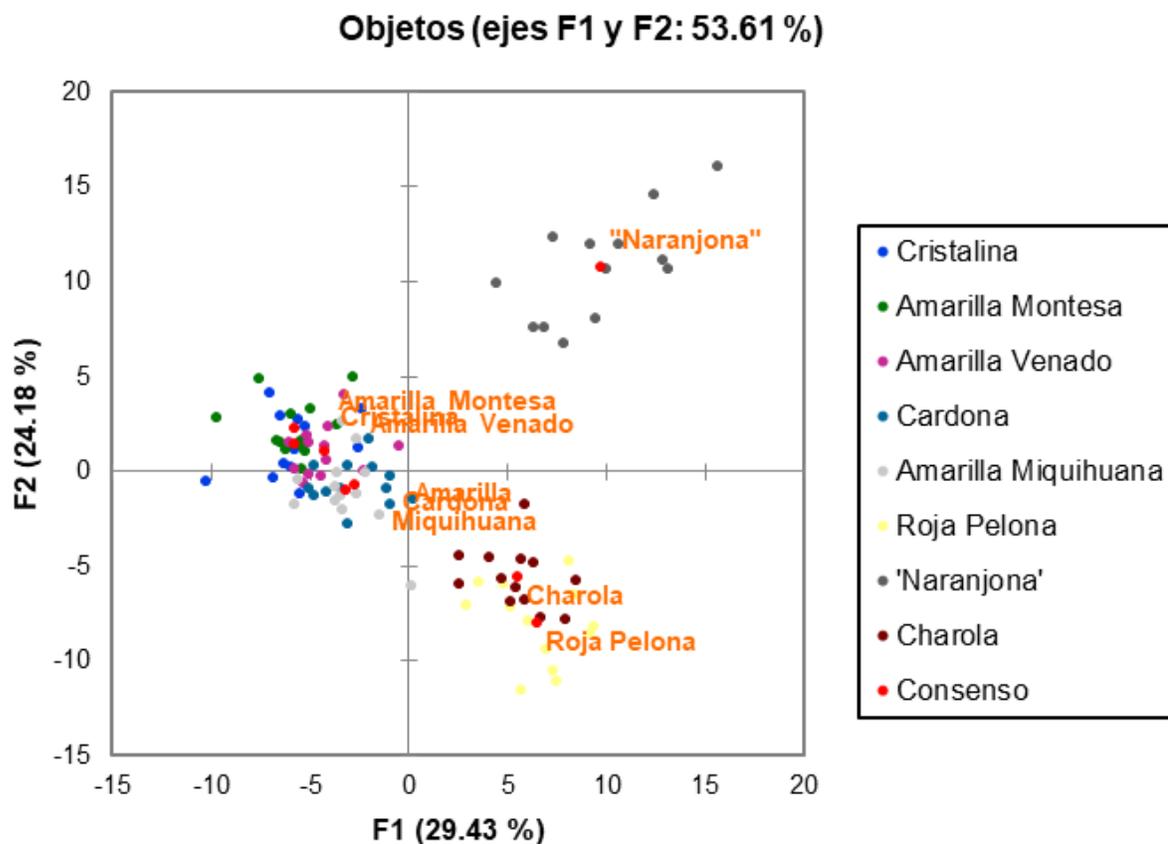


Figura 39. Correlación entre las dimensiones de la configuración del consenso inicial de los jueces y las variedades de tuna (*Opuntia* spp.) originaria del Altiplano Mexicano (Cristalina, Amarilla Montesa, Amarilla Venado, Cardona, Roja Pelona, “Naranjona”, Charola, Amarilla Miquihuana; ●) para los atributos de olor, sabor y resabio.

6.7. Correlación entre atributos sensoriales, parámetros instrumentales, físicos y fisicoquímicos

Se realizó la correlación mediante MFA de los atributos sensoriales con parámetros fisicoquímicos e instrumentales de todas las muestras de tuna evaluadas, considerando tanto los componentes evaluados en fruto entero, como todo lo evaluado en pulpa (en base húmeda):

AQP/Proximal (base húmeda; 7 parámetros): humedad, materia seca, proteína cruda, lípidos crudos, fibra cruda, cenizas y ELN.

AQP bs (AQP base seca; 6 parámetros): azúcares reductores, proteína cruda, lípidos crudos, fibra cruda, cenizas y ELN.

Color (instrumental; 15 parámetros): L*, a*, b*, C* y h, en cáscara externa (CE), en cáscara interna (CI) y en pulpa (P).

Dimensiones (7 parámetros): eje polar de fruto entero, eje ecuatorial mayor de fruto entero, eje ecuatorial menor de fruto entero, grosor de cáscara, eje polar de pulpa, eje ecuatorial mayor de pulpa, eje ecuatorial menor de pulpa.

Fisicoquímico (5 parámetros): vitamina C, azúcares reductores, °Brix, acidez titulable y pH.

Minerales (7 parámetros): Ca, K, Zn, P, Fe, Se y Cu.

Peso (5 parámetros): peso de fruto entero, de cáscara, de pulpa con semillas (entera), de pulpa sin semillas y de semillas.

Pigmentos y polifenoles (9 parámetros): indicaxantina (jugo), betanina (jugo), indicaxantina (pulpa), betanina (pulpa), clorofila total, carotenos, flavonoides, fenoles totales y capacidad antioxidante.

Porcentajes (4 parámetros): porcentaje de cáscara, de pulpa con semillas, de pulpa sin semillas, de semillas.

Sensorial (61 atributos): de apariencia [color (pulpa), superficie, brillo, homogeneidad, color de semillas, tamaño de semillas y cantidad de semillas], de olor [nota verde, dulce, ácido, fermentado, frutal, manzana, cítrico, pepino, jitomate, sandía, melón, piña, papaya, nopal, floral, tuna (intensidad), y fresco], de textura (dureza, cohesividad, jugosidad, crujiente, viscosidad, consistencia babosa, fibrosidad, granulosidad, aterciopelada, masticabilidad y adhesividad), de sabor [dulce, ácido, fermentado, amargo, salado, cítrico, miel, frutal, frutos rojos, pera, melón, sandía, piña,

papaya, manzana, pepino, jitomate, ciruela, nopal, tuna (intensidad), floral, nota verde y fresco], y de resabio (astringente, amargo y metálico).

Textura (instrumental; 2 parámetros): dureza en cáscara y fuerza de corte máxima (pulpa).

En la **Figura 40** se muestra el MFA de los atributos sensoriales, parámetros físicos, fisicoquímicos e instrumentales para cada variedad de tuna evaluada. El componente F1 explica el 21.59 % de la variabilidad entre muestras, mientras que el componente F2 explica el 13.67 % de dicha variabilidad, explicando un 35.26 % de la variabilidad total entre las variedades de tuna.

Correlacionadas con el componente 1, se observó que las variedades Reyna 1, Cristalina, Reyna 2, Amarillo Plátano, Amarilla Miquihuana, Amarilla Venado, Pico Chulo y Amarilla Montesa (ligeramente similares entre sí), fueron diferentes a las variedades Charola, Cardona, Roja San Martín, “Naranjona” y Roja Pelona.

En el primer cuadrante, correlacionadas positivamente con ambos componentes se encuentran las variedades Reyna 1 y Cristalina, caracterizadas por su matiz y luminosidad de color tanto en cáscara interna, externa y pulpa, así como del parámetro b^* y saturación del color en cáscara externa; sabor a intensidad de sabor a tuna, dulce, frutal y nota verde; su dureza en cáscara (instrumental); porcentaje y peso de semillas; contenido de Fe, Cu, Zn y K; por su contenido en composición de ELN y lípidos crudos (tanto en base húmeda como seca); apariencia en cantidad de semillas y heterogeneidad; olor a nota verde y fresco; granulosis (textura sensorial); y por su contenido de vitamina C.

En correlación positiva con F1 y negativa con F2 (cuadrante II), se encuentran las variedades Reyna 2, Amarillo Plátano, Amarilla Miquihuana, Amarilla Montesa, Pico Chulo y Amarilla Venado, caracterizándose por sus ejes polar y ecuatoriales (mayores y menores) tanto en el fruto entero como en pulpa; por su jugosidad, masticabilidad, dureza y crujiente

(textura sensorial); por su parámetro b^* y saturación del color tanto en cáscara interna como en pulpa; por su peso de fruto entero, pulpa con y sin semillas, y de semillas; por su fuerza de corte máxima (dureza instrumental); por su alto contenido de humedad, así como de azúcares reductores (tanto en base seca como húmeda); por su brillo (apariencia sensorial); por sus valores de pH y °Brix; porcentajes de pulpa (con y sin semillas); así como por sus sabores a nopal, sandía, pera, jitomate, pepino y piña; y por sus notas de olor frutal, cítrico, jitomate, pepino, dulce y piña.

Correlacionado con F2, se observó que las tunas Reyna 1, Cristalina, Reyna 2, Amarillo Plátano, Amarilla Miquihuana, Amarilla Venado, Pico Chulo y Amarilla Montesa (ligera-mente similares entre sí) fueron distintas a la Charola, Cardona, Roja San Martín, “Naranjona” y Roja Pelona.

Por otro lado, en el cuadrante III, correlacionadas negativamente con F1 y F2, se encuentran las variedades de tuna Roja San Martín, “Naranjona” y Roja Pelona, caracterizadas por el parámetro a^* del color tanto en cáscara interna, como cáscara externa y pulpa; por su contenido de indicaxantina (en pulpa), capacidad antioxidante, carotenos, fenoles totales y clorofila total; por su apariencia en color (de pulpa), así como tamaño y color de semillas (apariencia sensorial); contenido de fibra cruda y cenizas (tanto en base seca como húmeda); notas de olor ácido, melón, sandía, papaya, nopal e intensidad de olor tuna; sabor amargo, ácido, papaya, miel, cítrico, melón y fresco; textura (sensorial) cohesiva, consistencia babosa, adhesividad, viscosidad y fibrosidad; por su alta acidez titulable; y por su resabio metálico y amargo.

Finalmente, en correlación negativa con F1 y positiva con F2 se encuentran las variedades Charola y Cardona. Estas se caracterizan en gran medida por su apariencia en superficie (rugosa); contenido de betanina (tanto en pulpa como en jugo), flavonoides e indicaxantina (en jugo); olor floral, fermentado y manzana, contenido de materia seca y proteína cruda

(tanto en base húmeda como seca); textura aterciopelada (sensorial); contenido de Ca, Se y P; sabor a ciruela, floral, frutos rojos, salado, fermentado y manzana; por su porcentaje de cáscara, así como su grosor; y por su resabio astringente.

Este análisis permite observar con mayor claridad las diferencias y semejanzas entre las distintas tunas con base en todos los parámetros evaluados cuando todas estas características de las muestras (atributos sensoriales, y parámetros físicos y fisicoquímicos) son consideradas. Así, todas estas características presentes en las tunas pueden hacer de este fruto una muy buena alternativa para obtención de diversos colorantes y otros aditivos alimentarios (Aze-redo, 2009), ofreciendo sabores y olores más agradables que otros aditivos existentes (Piga, 2014; Torres-Bojórquez *et al.*, 2017). Asimismo, se observó que, de manera general, los frutos con pigmentaciones rojas (Charola, Roja Pelona, Cardona, “Naranjona” y Roja San Martín; correlación negativa con F1, **Figura 40**) fueron percibidos por los jueces con el mayor color (intensidad), así como de ser las variedades que presentaron un mayor contenido de pigmentos (betaxantinas, betacianinas, carotenos, etc.) y de compuestos fenólicos (flavonoides y fenoles totales), confiriendo una buena capacidad antioxidante en estos. Así, la percepción de esta tonalidad roja en tuna por parte de los jueces se pudo relacionar con su alto contenido de betalaínas [especialmente de betacianinas, siendo de los principales colorantes alimentarios naturales (Castellar *et al.*, 2012: citados por Valero-Galván *et al.*, 2021)] y su capacidad antioxidante. Por otro lado, de manera general se observó que las variedades de tuna con pigmentaciones verde-blancas (Reyna y Cristalina) y amarillo-anaranjadas (Amarilla Montesa, Amarilla Venado, Amarilla Miquihuana, Amarillo Plátano y Pico Chulo; correlación positiva con F1, **Figura 40**) presentaron una mayor correlación con sus dimensiones, así como peso de sus componentes morfológicos principales, y la percepción de ciertas características sensoriales percibidas por los jueces, como notas de olor y sabor dulces, a pepino, frutal, nota verde, entre otras, y principalmente por su contenido de vitamina C y parámetros de color (particularmente en el parámetro a^* , así como en la luminosidad, saturación y matiz).

7. CONCLUSIONES

- No se cumplió la hipótesis, ya que no se encontró una diferenciación entre muestras con base en su región de origen (Valle de Teotihuacán y Altiplano Mexicano) en los parámetros fisicoquímicos, físicos, ni de textura y color instrumentales. Aunque sí se diferenciaron, principalmente, por su color general de pulpa; siendo diferentes las tunas verde-blancas de las amarillo-anaranjadas y de las rojas; siendo resultado de la naturaleza de la variedad en sí, así como por el microclima en su zona de cultivo.
- La caracterización de las distintas variedades de tuna se realizó mediante el peso, dimensiones, acidez (total y aparente), contenido de macrocomponentes, vitamina C, minerales, pigmentos, compuestos antioxidantes (así como su capacidad), y evaluación de textura en cáscara y pulpa, así como del color en distintas partes del fruto, en los espacios CIELab y CIECh.
- Lo encontrado en el contenido de sólidos solubles, en relación con el contenido de humedad (y materia seca), en algunas de las variedades evaluadas, comparado con estudios anteriores, se debe (en parte) a la sequía que se dio en 2022 en el norte del país, produciendo frutos con menor humedad y sólidos solubles. De igual manera, debido a este evento climático, las variedades provenientes del Valle de Teotihuacán fueron, de manera general, considerablemente más grandes que aquellas del Altiplano Mexicano.
- Se determinó la textura instrumental de las distintas variedades de tuna, siendo la Reyna 2 el fruto con mayor firmeza en su pulpa y la Reyna 1 aquella con mayor dureza en su cáscara; mientras que, en color instrumental de pulpa, la tuna más oscura y roja fue la Charola, y la más brillante y de color amarillo fue la Amarilla Venado.
- Las variedades de tuna pigmentadas (como la Pico Chulo) presentaron un mayor contenido de azúcares reductores, así como de vitamina C, teniendo también aquellas de pulpa rosa-roja mayor contenido de selenio; mientras que la variedad “Naranjona” fue aquella con mayor acidez (total y aparente).

- De manera general, los frutos originarios del Altiplano Mexicano presentaron una capacidad antioxidante superior al de aquellos provenientes del Valle de Teotihuacán.
- El fruto Reyna 1 presentó, de manera general, una mayor correlación en sus atributos sensoriales evaluados que la Reyna 2, siendo de menor intensidad en esta última.
- Se presentan ciertas diferencias entre el GPA-PCA de los atributos sensoriales y la correlación de todos los parámetros evaluados (mediante el MFA) de las variedades de tuna ya que este último integra la información de 11 tablas de datos (sensoriales junto con la información física, fisicoquímica e instrumental). Sin embargo, se siguen notando algunas de las tendencias características de las distintas variedades de tuna como el dulzor, percepción ácida, textura y especialmente su color, permitiendo ver con mayor claridad las diferencias y semejanzas entre las distintas tunas con base en todos los parámetros evaluados (atributos sensoriales, y parámetros físicos y fisicoquímicos).
- Con el MFA, se pudo ver un cambio en diversos aspectos en la variedad Reyna entre un fruto en maduración (Reyna 1) y otro ya madurado (Reyna 2), mostrando una reducción (de Reyna 1 a Reyna 2) en el sabor a tuna (intensidad), dulzor percibido, frutal y nota verde, así como en notas de olor a nota verde y fresco, dureza de la cáscara, acidez, contenido de semillas, minerales, carbohidratos totales (ELN) y vitamina C, entre otros; pero un incremento en el tamaño y peso del fruto, jugosidad y humedad, dureza en pulpa y, por ende, masticabilidad, así como una mayor saturación del color (más brillante) tanto en cáscara interna como en pulpa, aunque mayor contenido de azúcares reductores (que no contribuyen en gran medida al sabor) junto con sólidos solubles ($^{\circ}\text{Bx}$), notas de sabor a nopal, sandía, pera, pepino, piña, y notas de olor frutal, cítrico, pepino, dulce y piña; siendo la variedad Cristalina muy similar a la Reyna 1.
- El MFA mostró gran similitud entre la Reyna 2 y las variedades de tuna amarillo-anaranjadas (Amarillo Plátano, Amarilla Miquihuana, Amarilla Montesa, Pico Chulo y Amarilla Venado), siendo caracterizadas por su tamaño (tanto en longitud como en peso), sus características sensoriales como jugosidad, masticabilidad, dureza y crujiente, aunado a su alto contenido de humedad y dureza instrumental (fuerza de corte

máxima), y particularmente por su contenido de azúcares, baja acidez, y notas frutales (frutal, sandía, pera, piña), ciertas vegetales (nopal, jitomate, pepino), entre otras.

- Se observó cierta similitud, gracias al MFA, entre las tunas rojas (Roja San Martín, Roja Pelona, Charola y Cardona), así como con una de las variedades anaranjadas: la “Naranjona”. Las variedades Roja San Martín y Roja Pelona presentaron una mayor similitud con la “Naranjona” en su contenido de indicaxantina en pulpa, por su alto contenido de fibra cruda, cenizas, clorofila, carotenos y fenoles totales, resultando en una elevada capacidad antioxidante; así como por la percepción sensorial de las semillas (tamaño y color), aroma ácido, frutal (melón, sandía, papaya) y vegetal (nopal y tuna), sabores amargo, ácido, frutales (papaya, melón, cítrico), miel y fresco (aunado a una elevada acidez titulable), así como por su textura (sensorial) babosa, adhesiva, viscosa y fibrosa, y resabios metálico y amargo. Sin embargo, las variedades Charola y Cardona presentaron una apariencia más rugosa (pero textura aterciopelada en boca), así como notas de olor floral, fermentado y a manzana, junto con una cantidad mínima de humedad, pero alto contenido de proteína cruda, alto contenido de elementos de gran importancia biológica, como calcio, selenio y fósforo, presentando también la mayor proporción de cáscara (como porcentaje y grosor), así como notas de sabor a ciruela, floral, frutos rojos, salado, fermentado y a manzana, y resabio astringente; siendo diferentes estas variedades a las tunas Roja San Martín, “Naranjona” y Roja Pelona, a pesar de tratarse (en su mayoría) de tuna roja.

8. PERSPECTIVAS

- Dado que México es el país con mayor diversidad de tunas, y que este ha sido el primer estudio en el análisis e integración de tantos parámetros físicos, fisicoquímicos, y particularmente del perfil sensorial de tuna, recomendaría continuar caracterizando distintas variedades de tuna provenientes también de otros estados de la República Mexicana (especialmente en su perfil sensorial), para así generar más información científica de este fruto.
- Realizar un estudio similar (con las mismas variedades), en una temporada en la que no se presente una sequía como la del año 2022, o idealmente en condiciones de riego suficientes, para poder observar de mejor forma el perfil sensorial de las variedades evaluadas, así como sus características físicas y fisicoquímicas.
- Tener un mejor control en el manejo postcosecha de los frutos para su adecuada evaluación.
- Ampliar el estudio con estudios sensoriales hedónicos, o bien, de consumidor, para identificar qué variedades (del presente estudio e incluso variedades diferentes) son más preferidas o de mayor agrado por la gente, pudiendo ser de utilidad para la producción de esas variedades, incluso para el desarrollo de nuevos productos.
- Dar difusión a los resultados encontrados para hacer del conocimiento del consumidor la composición fisicoquímica y sensorial de las tunas, y apoyar su posicionamiento en el mercado de frutas mexicanas.

9. REFERENCIAS

- 1) Abdi, H., Williams, L. J., & Valentin, D. (2013). Multiple factor analysis: Principal component analysis for multitable and multiblock data sets. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 5(2), 149–179. <https://doi.org/10.1002/wics.1246>
- 2) Al-Maiman, S. A., & Ahmad, D. (2002). Changes in physical and chemical properties during pomegranate (*Punica granatum* L.) fruit maturation. *Food Chemistry*, 76, 437–441.
- 3) Alba, J. E. (2013). *USO DE ATMÓSFERAS CONTROLADAS PARA CONSERVAR TUNA ROJA (Opuntia ficus-indica (L.) Mill. var. Rojo San Martín) MÍNIMAMENTE PROCESADA*. [Tesis de Maestría, Universidad Veracruzana]. Universidad Veracruzana – Repositorio Institucional.
- 4) Aluko, R. E. (2012). *Functional Foods and Nutraceuticals* (R. E. Aluko, D. A. Golden, R. W. Hartel, H. Heymann, J. H. Hotchkiss, M. G. Johnson, J. Montecalvo Jr., S. S. Nielsen, & J. L. Silva, Eds.). Springer.
- 5) Amaya, J. E. (2009). *El Cultivo de Tuna (Opuntia ficus indica)*. Trujillo: Gerencia Regional Agraria La Libertad.
- 6) Aquino, E. N., Chavarría, Y., Chávez, J. L., Guzmán, R. I., Silva, E. R., & Verdalet, I. (2012). Caracterización fisicoquímica de siete variedades de tuna (*Opuntia* spp.) color rojo-violeta y estabilidad del pigmento de las dos variedades con mayor concentración. *Investigación y Ciencia de La Universidad Autónoma de Aguascalientes*, 20(55), 3–10.
- 7) Anon. (2016). *Code of Federal Regulations*, Title 21, Part 101.9. Food Nutrition Labeling of Food. Washington, DC: U.S. Government Printing Office.
- 8) Araya, H., Clavijo, C., & Herrera, C. (2006). Capacidad antioxidante de frutas y verduras cultivados en Chile. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 56(4), 361–365.

- 9) Arnés, E., Severiano-Pérez, P., & Astier, M. (2021). Sensory profile and acceptance of maize tortillas by rural and urban consumers in Mexico. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 102(6), 2300–2308. <https://doi.org/10.1002/jsfa.11568>
- 10) AOAC. (1990). *Official methods of analysis*. 15ª edición (En línea). Washington DC: AOAC International.
- 11) AOAC. (2000). *Official methods of analysis*. 17ª edición (En línea). Washington DC: AOAC International.
- 12) AOAC. (2005). *Official methods of analysis*. 18ª edición (En línea). Gaithersburg, MD: AOAC International.
- 13) AOAC. (2015). *Official methods of analysis*. 19ª edición (En línea). Rockville, MD: AOAC International.
- 14) AOAC. (2017). *Official methods of analysis*. 19ª edición (En línea). Rockville, MD: AOAC International.
- 15) Ayala, F. I. (2016). *PERFIL SENSORIAL DE ESPECIES TRADICIONALES SUB-VALORADAS Y SUBUTILIZADAS DE MÉXICO: QUELITES*. [Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México]. TESIUNAM.
- 16) Ayllon, J. C., Omaña, J. M., Sangerman-Jarquín, D. M., Garza, L. E., Quintero, J. M., & González, F. de J. (2015). Modelo de transporte en México para la minimización de costos de distribución de tuna (*Opuntia* spp.) en fresco. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(7), 1615–1628. <https://doi.org/10.29312/remexca.v6i7.554>
- 17) Azeredo, H. M. C. (2009). Betalains: properties, sources, applications, and stability - a review. *International Journal of Food Science and Technology*, 44(12), 2365–2376. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2007.01668.x>
- 18) Badui, S. (2006). *Química de los Alimentos* (E. Quintanar Duarte, Ed.; Cuarta edición). Pearson Educación México. www.pearsoneducacion.net
- 19) Barbera, G., Carimi, F., Inglese, P., & Panno, M. (1992). Physical, morphological and chemical changes during fruit development and ripening in three cultivars of prickly

- pear, *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller. *Journal of Horticultural Science*, 67(3), 307–312. <https://doi.org/10.1080/00221589.1992.11516253>
- 20) Bariza, Z., Noui, Y., Asma, T., & Yassine, N. (2017). Algerian Prickly Pear (*Opuntia ficus-indica* L.) Physicochemical Characteristics. *International Journal of Scientific Research & Engineering Technology*, 5, 14–17. <https://www.researchgate.net/publication/333433114>
- 21) Beetsma, J. (2020, septiembre 11). *The CIELAB L*a*b* System – the Method to Quantify Colors of Coatings*. Prospector® Knowledge Center. <https://knowledge.ulprospector.com/10780/pc-the-cielab-lab-system-the-method-to-quantify-colors-of-coatings/>
- 22) Behling, E. B., Sendão, M. C., Francescato, H. D. C., Antunes, L. M. G., & Bianchi, M. de L. P. (2004). Flavonóide quercetina: aspectos gerais e ações biológicas. *Alimentos e Nutrição*, 15(3), 285–292.
- 23) Bourne, M. C. (1982). *Food Texture and Viscosity*. Nueva York: Academic Press.
- 24) Bouzoubaâ, Z., Essoukrati, Y., Tahrouch, S., Hatimi, A., Gharby, S., & Harhar, H. (2016). Phytochemical study of prickly pear from southern Morocco. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 15(2), 155–161. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2014.09.002>
- 25) Breene, W. M. (1975). APPLICATION OF TEXTURE PROFILE ANALYSIS TO INSTRUMENTAL FOOD TEXTURE EVALUATION. *Journal of Texture Studies*, 6, 53–82.
- 26) Brend, Y., Galili, L., Badani, H., Hovav, R., & Galili, S. (2012). Total Phenolic Content and Antioxidant Activity of Red and Yellow Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) Seeds as Affected by Baking and Cooking Conditions. *Food and Nutrition Sciences*, 3(8), 1150–1155. <https://doi.org/10.4236/fns.2012.38151>
- 27) Brezmes, J. (2001). *Diseño de una nariz electrónica para la determinación no destructiva del grado de maduración de la fruta*. [Tesis de Doctorado, Universitat Politècnica de Catalunya]. CORA – TDX: Tesis Doctorals en Xarxa.

- 28) Brutsch, M.O. (1979). The prickly pear (*Opuntia ficus-indica*) as a potential fruit crop for the drier regions of the Ciskei. *Crop Production*, 8, 131–137.
- 29) Bunaciu, A. A., Danet, A. F., Fleschin, Ș., & Aboul-Enein, H. Y. (2016). Recent Applications for in Vitro Antioxidant Activity Assay. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 46, 389–399. <https://doi.org/10.1080/10408347.2015.1101369>
- 30) Burrill, L. M., Deethardt, D., & Saffle, R.L. (1962). Two mechanical devices compared with taste-panel evaluation for measuring tenderness. *Food Technology*, 16(10), 145–+.
- 31) Calvo, S. C., Gómez, C., López, C., & Royo, M. A. (Eds.). (2011). *Nutrición, salud y alimentos funcionales*. Universidad Nacional de Educación a Distancia.
- 32) Carmona, R. P. (2013). *Evaluación comparativa de dos metodologías sensoriales para generar perfiles descriptivos en alimentos*. [Tesis de Maestría, Universidad Autónoma Metropolitana]. TESIUAMI.
- 33) Castro, L. (2001). *Guía básica para el establecimiento y mantenimiento del cultivo de la granadilla*. Bogotá: Asociación Hortofrutícola de Colombia.
- 34) Chang, C.-C., Yang, M.-H., Wen, H.-M., & Chern, J.-C. (2002). Estimation of Total Flavonoid Content in Propolis by Two Complementary Colorimetric Methods. *Journal of Food and Drug Analysis*, 10(3), 178–182. <https://doi.org/10.38212/2224-6614.2748>
- 35) Chavez-Santoscoy, R. A., Gutierrez-Uribe, J. A., & Serna-Saldívar, S. O. (2009). Phenolic composition, antioxidant capacity and in vitro cancer cell cytotoxicity of nine prickly pear (*Opuntia* spp.) juices. *Plant Foods for Human Nutrition*, 64(2), 146–152. <https://doi.org/10.1007/s11130-009-0117-0>
- 36) Chiteva, R., & Wairagu, N. (2013). Chemical and nutritional content of *Opuntia ficus-indica* (L.). *African Journal of Biotechnology*, 12(21), 3309–3312. <https://doi.org/10.5897/ajb12.2631>

- 37) Christofi, M., Mourtzinou, I., Lazaridou, A., Drogoudi, P., Tsitlakidou, P., Biliaderis, C. G., & Manganaris, G. A. (2020). Elaboration of novel and comprehensive protocols toward determination of textural properties and other sensorial attributes of canning peach fruit. *Journal of Texture Studies*, 52(2), 228–239. <https://doi.org/10.1111/jtxs.12577>
- 38) Clement, J. S., Mabry, T. J., Wyler, H., & Dreiding, A. S. (1994). Chemical Review and Evolutionary Significance of the Betalains. En: Behnke, H. D., Mabry, T. J. (eds.), *Caryophyllales. Evolution and Systematics* (pp. 247–261). Springer, Berlin. https://doi.org/10.1007/978-3-642-78220-6_11
- 39) Codex Alimentarius Commission. (2009). *Report of the 30th session of the Codex Committee on Nutrition and Foods for Special Dietary Uses*. Food and Agriculture Organization, World Health Organization. http://www.codex-alimentarius.net/download/report710/al132_26e.pdf
- 40) Combs, G. F. (1988). Selenium in Foods. *Advances in Food Research*, 32, 85–113.
- 41) Commission Internationale de l’Eclairage [CIE]. (2004). *Technical Report: Colorimetry (CIE 15:2004)*. International Commission on Illumination.
- 42) COMETUNA, Red Nopal, & CONABIO. (2009). *Nopales tunas y xoconostles* (2ª edición). Consejo Mexicano de Nopal y Tuna, A.C., Red Nopal y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- 43) Corrales, J., & Flores, C. A. (2003). *Nopalitos y tunas: producción, comercialización, poscosecha e industrialización* (C. A. Flores, Ed.). Universidad Autónoma Chapingo, CUESTAAM-Programa Nopal.
- 44) Corrales, J., & Hernández, S. (2005). CAMBIOS EN LA CALIDAD POSTCOSECHA DE VARIEDADES DE TUNA CON Y SIN SEMILLA. *Revista Fitotécnica Mexicana*, 28(1), 9–16.
- 45) Cruz, H. P. (1983). Evaluación de selecciones de nopal tunero (*Opuntia* spp.) en la zona semidesértica del estado de Puebla. *Memoria, VII Congreso Nacional de Fitogenética*. Uruapan, Michoacán, pp. 456–471.

- 46) Dairou, V., & Sieffermann, J.-M. (2002). A Comparison of 14 Jams Characterized by Conventional Profile and a Quick Original Method, the Flash Profile. *Journal of Food Science*, 67(2), 826–834.
- 47) Damodaran, S., Parkin, K. L., & Fennema, O. R. (Eds.). (2007). *Fennema's Food Chemistry* (Fourth Edition). CRC Press.
- 48) Dasgupta, A., & Klein, K. (Eds.). (2014). *Antioxidants in Food, Vitamins and Supplements: Prevention and Treatment of Disease*. Elsevier.
- 49) Davis, E. A. (1995). Functionality of sugars: physicochemical interactions in foods. *American Journal of Clinical Nutrition*, 62, 170S-177S. <https://academic.oup.com/ajcn/article-abstract/62/1/170S/4651702>
- 50) Dehbi, F., Hasib, A., Ouattmane, A., Elbatal, H., & Jaouad, A. (2014). Physicochemical Characteristics of Moroccan Prickly Pear Juice (*Opuntia ficus indica* L.). *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 4(4), 300–306.
- 51) Delgadillo-Macías, J. (2019). Producción y consumo agroalimentario en áreas peri-metropolitanas. Una aproximación tipológica desde el enfoque de proximidad. *Estudios Sociales. Revista de Alimentación Contemporánea y Desarrollo Regional*, 29(53). <https://doi.org/10.24836/es.v29i53.701>
- 52) de Wit, M., Nel, P., Osthoff, G., & Labuschagne, M. T. (2010). The effect of variety and location on cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) fruit quality. *Plant Foods for Human Nutrition*, 65(2), 136–145. <https://doi.org/10.1007/s11130-010-0163-7>
- 53) Dijksterhuis, G. (1996). Procrustes Analysis in Sensory Research. En T. Naes & E. Risvik (Eds.), *Multivariate analysis of data in sensory science* (Edición C, Vol. 16, pp. 185–219). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0922-3487\(96\)80031-1](https://doi.org/10.1016/S0922-3487(96)80031-1)
- 54) Domínguez-García, I. A., Granados-Sánchez, M. R., Sagarnaga-Villegas, L. M., Salas-González, J. M., & Aguilar-Ávila, J. (2017). Viabilidad económica y financiera de nopal tuna (*Opuntia ficus-indica*) en Nopaltepec, Estado de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(6), 1371–1382. <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i6.304>

- 55) du Toit, R., Volsteadt, Y., & Apostolides, Z. (2001). Comparison of the antioxidant content of fruits, vegetables and teas measured as vitamin C equivalents. *Toxicology*, 166, 63–69.
- 56) El-Gharras, H., Hasib, A., Jaouad, A., & El-Bouadili, A. (2006). CHEMICAL AND PHYSICAL CHARACTERIZATION OF THREE CULTIVARS OF MOROCCAN YELLOW PRICKLY PEARS (*Opuntia ficus-indica*) AT THREE STAGES OF MATURITY. *Ciencia y Tecnología Alimentaria*, 5(2), 93–99. <https://doi.org/10.1080/11358120609487677>
- 57) Elmadfa, I., & Meyer, A. L. (2010). Importance of food composition data to nutrition and public health. *European Journal of Clinical Nutrition*, 64: S4–S7. <https://doi.org/10.1038/ejcn.2010.202>
- 58) Escalona, H. B. (1995). *EVALUACION ESTADISTICA DE METODOLOGIAS PARA PRUEBAS SENSORIALES A TRAVES DE ESTUDIOS DE CASO*. [Tesis de Maestría, Universidad Autónoma Metropolitana]. TESIUAMI.
- 59) Escobedo, E. (2012). *Comparación de las características sensoriales, textura y color de zarzamoras silvestres y comerciales*. [Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México]. TESIUNAM.
- 60) Escofier, B., & Pagès, J. (1984). L'analyse factorielle multiple: une méthode de comparaison de groupes de variables. *Data Analysis and Informatics III*, 41–55.
- 61) Esparza, S. (2010). *DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DEL GÉNERO OPUNTIA (CACTACEAE) EN MÉXICO* [Tesis de maestría, Universidad Autónoma de San Luis Potosí]. Repositorio Institucional de la UASLP.
- 62) FAO/WHO, & ICARDA. (2018). *ECOLOGIA DEL CULTIVO, MANEJO Y USOS DEL NOPAL* (P. Inglese, C. Mondragon, A. Nefzaoui, & C. Sáenz, Eds.). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Centro Internacional de Investigaciones Agrícolas en Zonas Áridas.
- 63) FAO/ILSI. (1997). *Preventing Micronutrient Malnutrition: A guide to Food-Based Approaches*. Washington, D.C.: ILSI Press.

- 64) Fawole, O.A., & Opara, U.L. (2013). Changes in physical properties, chemical and elemental composition and antioxidant capacity of pomegranate (cv. Ruby) fruit at five maturity stages. *Scientia Horticulturae*, 150, 37–46. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2012.10.026>
- 65) Fideicomiso de Riesgo Compartido. (2017, septiembre 6). *La TUNA, una fruta muy mexicana*. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/firco/articulos/la-tuna-una-fruta-muy-mexicana?idiom=es>
- 66) Figueroa-Cates, I., Martínez-Damián, M. T., Rodríguez-Pérez, E., Colinas-León, M. T., Valle-Guadarrama, S., Ramírez-Ramírez, S., & Gallegos-Vázquez, C. (2010). CONTENIDO DE PIGMENTOS, OTROS COMPUESTOS Y CAPACIDAD ANTI-OXIDANTE EN 12 CULTIVARES DE TUNA (*Opuntia* spp.) DE MÉXICO. *Agrociencia*, 44(7), 763–771.
- 67) Fischer, G. (2010). Condiciones ambientales que afectan crecimiento, desarrollo y calidad de las pasifloráceas. *Memorias Primer Congreso Latinoamericano de Passiflora*, 10–22.
- 68) Floegel, A., Kim, D. O., Chung, S. J., Koo, S. I., & Chun, O. K. (2011). Comparison of ABTS/DPPH assays to measure antioxidant capacity in popular antioxidant-rich US foods. *Journal of Food Composition and Analysis*, 24(7), 1043–1048. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2011.01.008>
- 69) Galán, G. M., González, R. J., & Drago, S. R. (2013). Perfil nutricional y dializabilidad de minerales de alimentos de interés social. *Revista Española de Nutrición Humana y Dietética*, 17(1), 3–9.
- 70) Gallegos, C., Cervantes, J., Reyes, J. A., Fernández, R., Mondragon, C., Luna, J., Martínez, J. C., & Rodriguez, E. (2006). INVENTORY OF THE MAIN COMMERCIAL CACTUS PEAR (*OPUNTIA* SPP.) CULTIVARS IN MEXICO. *Acta Horticulturae*, 728, 17–28. <https://doi.org/10.17660/actahortic.2006.728.1>

- 71) García, J. (2016). *Caracterización sensorial (Perfil Flash) y afectiva (Internal Preference Mapping) de alimentos de la milpa de la Sierra Tarahumara*. [Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México]. TESIUNAM.
- 72) Gebhardt, S. E., & Thomas, R. G. (2002). *Nutritive Value of Foods*. Beltsville: U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service.
- 73) Geil, P. B., & Anderson, J. W. (1994). Nutrition and health implications of dry beans: A review. *Journal of the American College of Nutrition*, 13(6), 549–558. <https://doi.org/10.1080/07315724.1994.10718446>
- 74) Giménez, M. A., Gámbaro, A., Miraballes, M., Roascio, A., Amarillo, M., Sammán, N., & Lobo, M. (2015). Sensory evaluation and acceptability of gluten-free Andean corn spaghetti. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 95(1), 186–192. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6704>
- 75) Gómez-Maqueo, A., Antunes-Ricardo, M., Welti-Chanes, J., & Cano, M. P. (2020). Digestive stability and bioaccessibility of antioxidants in prickly pear fruits from the Canary Islands: Healthy foods and ingredients. *Antioxidants*, 9(2). <https://doi.org/10.3390/antiox9020164>
- 76) González Cruz, E., & Vela Ramírez, E. (2010). *Me he de Comer esa Tuna. La Tuna y el Nopal del Valle de Teotihuacán, Estado de México*. Ecos, Voces y Acciones, A.C.
- 77) Gordon, M. H. (1990). THE MECHANISM OF ANTIOXIDANT ACTION IN VITRO. En B. J. F. Hudson (Ed.), *Food Antioxidants* (pp. 1–18). Elsevier Science Publishers Ltd.
- 78) Greenhoff, K., & MacFie, H. J. H. (1994). Preference mapping in practice. En D. M. H. Thomson, & H. J. H. MacFie, *Measurement of food preferences* (pp. 137–166). Glasgow: Blackie Academic & Professional.
- 79) Hadj Sadok, T., Ghezali, H., Hatab Bey, R., & Hamdani, S. (2019). Evolution of Bioactive Components of Prickly Pear Juice (*Opuntia ficus indica*) and Cocktails with Orange juice. *Nature & Technology Journal*, B(20), 45–53. <http://www.univ-chlef.dz/revuenatecFormeréviséacceptéle:29/01/2019>

- 80) Han, X., Shen, T., & Lou, H. (2007). Dietary Polyphenols and Their Biological Significance. *International Journal of Molecular Sciences*, 8, 950–988. <http://dx.doi.org/10.3390/i8090950>
- 81) Harris, D. C. (2016). *Análisis químico cuantitativo* [D. C. Harris, V. Berenguer & A. Berenguer, Eds.; 3ª edición (6ª edición original)]. Editorial Reverté.
- 82) Hernández, R. L. (1978). Distribución del sistema radical de nopal (*Opuntia amyclaea* Tenore). [Tesis de Maestría, Colegio de Postgraduados Chapingo, México].
- 83) Huang, J., Duan, C., Deng, Y., Li, F., Feng, D., Fan, D., & Gu, J. (2022). Comparison of Color and Texture Property Change rules of Four Fenjiao (Musa ABB Pisang Awak) Varieties During Fruit Ripening. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 43(2), 277–284.
- 84) Humphrey, A. M. (1980). CHLOROPHYLL. *Food Chemistry*, 5, 57–67. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0308-8146\(80\)90064-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0308-8146(80)90064-3)
- 85) Hutchings, J. B., Ronnier Luo, M., & Ji, W. (2013). Food appearance quality assessment and specification. En D. Kilcast (Ed.). *Instrumental assessment of food sensory quality. A practical guide* (pp. 26–52). Woodhead Publishing.
- 86) INEGI. (2022, agosto 22). *Territorio de México*. Gobierno de México. <https://cuentame.inegi.org.mx/territorio/default.aspx?tema=T>
- 87) INEGI. (2022, septiembre 20). *Catálogo Único de Claves de Áreas Geoestadísticas Estatales, Municipales y Localidades*. Gobierno de México. <https://www.inegi.org.mx/app/ageeml/>
- 88) Inglese, P. (1995). Orchard planting management. En G. Barbera, P. Inglese y E. Pimienta Barrios (Eds.). *Agro-ecology cultivation and uses of cactus pear* (78–91).
- 89) Inglese, P., Barbera, G., & La Mantia, T. (1995). Research strategies for the improvement of cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) fruit quality and production. *Journal of Arid Environments*, 29, 455–468. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0140-1963\(95\)80018-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0140-1963(95)80018-2)

- 90) Institute of Medicine [IOM]. (2005). *Dietary Reference Intakes: energy, carbohydrates, fiber, fat, fatty acids, cholesterol, protein and amino acids*. Food and Nutrition Board. Washington, DC: National Academies Press.
- 91) ISO (2007). *ISO 8589:2007 (E). Sensory analysis—general guidance for the design of testrooms*. Geneva, Switzerland: The International Organization of Standardization.
- 92) ISO. (2016). *13299:2016 Sensory analysis—Methodology—General guidance for establishing a sensory profile*. The International Organization of Standardization. <https://www.iso.org/standard/58042.html>
- 93) Jiménez, O. (2017). *Obtención, evaluación de pigmentos microencapsulados a partir de frutos xkijit (Renealmia alpinia) e incorporación en una matriz alimenticia*. [Tesis de Maestría, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla]. Repositorio Institucional BUAP.
- 94) Johnson, M. (2021, febrero 2). *Generalized Procrustes Analysis*. Society of Sensory Professionals. <https://www.sensorysociety.org/knowledge/sspwiki/Pages/Generalized%20Procrustes%20Analysis.aspx>
- 95) Kan, J., & Chen, K. (2021). *Essentials of Food Chemistry*. En J. Kan & K. Chen (Eds.), *Essentials of Food Chemistry*. Singapore: Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-16-0610-6>
- 96) Kilcast, D. (Ed.). (2013). *Instrumental Assessment of Food Sensory Quality*. Woodhead Publishing.
- 97) Kim, D. O., Chun, O. K., Kim, Y. J., Moon, H. Y., & Lee, C. Y. (2003). Quantification of Polyphenolics and Their Antioxidant Capacity in Fresh Plums. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51(22), 6509–6515. <https://doi.org/10.1021/jf0343074>
- 98) Kimball, D. A. (1991). Chapter 2. Brix and Soluble Solids. En D. A. Kimball (Ed.), *Citrus Processing: Quality Control and Technology* (pp. 7–33). Springer Dordrecht. <https://doi.org/10.1007/978-94-011-3700-3>

- 99) Khoo, H. E., Azlan, A., Tang, S. T., & Lim, S. M. (2017). Anthocyanidins and anthocyanins: Colored pigments as food, pharmaceutical ingredients, and the potential health benefits. *Food and Nutrition Research*, 61. <https://doi.org/10.1080/16546628.2017.1361779>
- 100) Konica Minolta. (s.f.). *Understanding the CIE L*C*h Color Space*. Konica Minolta, Inc. <https://sensing.konicaminolta.us/us/blog/understanding-the-cie-lch-color-space/>
- 101) Konica Minolta. (2007). *PRECISE COLOR COMMUNICATION. COLOR CONTROL FROM PERCEPTION TO INSTRUMENTATION*. Konica Minolta, Inc.
- 102) Korićanac, A., Glišić, I., Lukić, M., Popović, B., Mitrović, O., Glišić, I. S., & Paunović, G. (2020). FRUIT QUALITY OF PLUM (*PRUNUS DOMESTICA* L.) CULTIVARS ‘ČAČANSKA LEPOTICA’ AND ‘EMPRESS’ AFTER COLD STORAGE. *Proceedings of the XI International Scientific Agricultural Symposium “Agrosym 2020,”* 127–132. <https://www.researchgate.net/publication/346227840>
- 103) Lakshminarayana, S., Alvarado-y-Sosa, L., & Barrientos-Pérez, F. (1979). The development and postharvest physiology of the fruit of cactus pear (*Opuntia amyclaea* T.). En: G. E. Inglet, & G. Charalambus (Eds.), *Tropical Foods: Chemistry and Nutrition* (Vol. 1, pp. 69 – 93). New York: Academic Press.
- 104) Lam, H. H., Nguyen, T. M. T., Do, T. A. S., Dinh, T. H., & Dang-Bao, T. (2021). Quantification of total sugars and reducing sugars of dragon fruit-derived sugar-samples by UV-Vis spectrophotometric method. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 947(1), 1–6. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/947/1/012041>
- 105) Lamghari, R., Kossori, E. 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, 263–270.
- 106) Lawless, H. T., & Heymann, H. (2010). *Sensory Evaluation of Food. Principles and Practices* (D. R. Heldman, Ed.; 2a ed.). Nueva York: Springer.
- 107) Leggett, G. J. (2008). Color measurement techniques for food products. En C. A. Culver, & R. E. Wrolstad (Eds.). *Color Quality of Fresh and Processed Foods* (Vol.

- 983, pp. 7–16). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/bk-2008-0983.ch002>
- 108)** Lichtenthaler, H. K., & Wellburn, A. R. (1983). Determinations of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents. *Biochemical Society Transactions*, *11*, 591–592.
- 109)** Lu, R. (2013). Principles of solid food texture analysis. En D. Kilcast (Ed.), *Instrumental Assessment of Food Sensory Quality. A Practical Guide* (pp. 103–128). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9780857098856.1.103>
- 110)** Martín del Campo, S. T., Ramírez-Anaya, J. P., Pimienta-Barrios, E., Castañeda-Saucedo, M. C., Samaniego-Sánchez, C., & Gómez-Hernández, H. E. (2019). Identifying non-destructive growth and maturity indexes of Prickly pear (*Opuntia albicarpa* S. Var. Burróna) and evaluation of freeze-drying conditions. *CYTA - Journal of Food*, *17*(1), 917–925. <https://doi.org/10.1080/19476337.2019.1676315>
- 111)** Martínez-Flórez, S., González-Gallego, J., Culebras, J. M., & Tuñón, M. J. (2002). Los flavonoides: propiedades y acciones antioxidantes Correspondencia. *Nutrición Hospitalaria*, *XVII*(6), 271–278.
- 112)** Martínez-González, M. E., Balois-Morales, R., Alia-Tejacal, I., Cortes-Cruz, M. A., Palomino-Hermosillo, Y. A., & López-Gúzman, G. G. (2017). Poscosecha de frutos: maduración y cambios bioquímicos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, *19*, 4075–4087.
- 113)** McCleary, B. V., & Prosky, L. (2001). *Advanced dietary fibre technology*. London: Blackwell Science.
- 114)** McLellan, M. R., Lind, L. R., & Kime, R. W. (1995). HUE ANGLE DETERMINATIONS AND STATISTICAL ANALYSIS FOR MULTIQUADRANT HUNTER L,a,b DATA. *Journal of Food Quality*, *18*(3), 235–240. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4557.1995.tb00377.x>

- 115) Medina, E. M. D., Rodríguez, E. M. R., & Romero, C. D. (2007). Chemical characterization of *Opuntia dillenii* and *Opuntia ficus indica* fruits. *Food Chemistry*, 103(1), 38–45. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.06.064>
- 116) Mérillon, J.-M., & Ramawat, K. G. (Eds.). (2019). *Bioactive Molecules in Food*. Springer Nature Switzerland. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-78030-6>
- 117) Meullenet, J. F., Xiong, R., & Findlay, C. J. (2007). *Multivariate and Probabilistic Analyses of Sensory Science Problems*. (pp. 37–46). USA: Blackwell Publishing.
- 118) Meza, T. (2019). *Evaluación de la vida de anaquel (propiedades sensoriales, físico-químicas y antioxidantes) de tuna (Opuntia ficus-indica) procesada mediante tecnología de obstáculos*. [Tesis de Licenciatura, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla]. Repositorio Institucional BUAP.
- 119) Monroy-Gutiérrez, T., Teresa Martínez-Damián, M., Barrientos-Priego, A. F., Gallegos-Vázquez, C., Rodríguez-Pérez, J.E., & Teresa Colinas-León, M. B. (2017). Evaluación de algunas características físicas y químicas de frutos de xocotuna, tuna y xoconostle en poscosecha. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(1), 189–197.
- 120) Morris, V. C., & Levander, O. A. (1970). Selenium Content of Foods. *Journal of Nutrition*, 100, 1383–1388. <https://academic.oup.com/jn/article-abstract/100/12/1383/4778987>
- 121) Moßhammer, M. R., Stintzing, F. C., & Carle, R. (2006). Cactus Pear Fruits (*Opuntia* spp.): A Review of Processing Technologies and Current Uses. *Journal Of The Professional Association For Cactus Development*, 1–25.
- 122) Mostacero, B. Y. (2018). *EVALUACIÓN DE LA MADUREZ Y CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS Y SENSORIALES EN POSCOSECHA DE TUNA (Opuntia ficus-indica) VARIEDAD AMARILLA ALMACENADA EN REFRIGERACIÓN*. [Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann-Tacna]. Repositorio Institucional UNJBG.

- 123)** Müller, L., Gnoyke, S., Popken, A. M., & Böhm, V. (2010). Antioxidant capacity and related parameters of different fruit formulations. *LWT*, 43(6), 992–999. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2010.02.004>
- 124)** Murray, J. M., Delahunty, C. M., & Baxter, I. A. (2001). Descriptive sensory analysis: past, present and future. *Food Research International*, 34(6), 461–471. [https://doi.org/10.1016/S0963-9969\(01\)00070-9](https://doi.org/10.1016/S0963-9969(01)00070-9)
- 125)** Navarro-Alarcon, M., & Cabrera-Vique, C. (2008). Selenium in food and the human body: A review. *Science of the Total Environment*, 400(1–3), 115–141. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.06.024>
- 126)** Nerd, A., & Mizrahi, Y. (1995). Reproductive biology. En: G. Barbera; P. Inglese & E. Pimienta-Barrios (Eds.). *Agro-ecology, cultivation and uses of cactus pear* (pp. 49–57). FAO, Plant Production and Protection Paper 132.
- 127)** Nielsen, S. S. (2010). Vitamin C Determination by Indophenol Method. En: S. S. Nielsen, (Ed.). *Food Analysis Laboratory Manual*. Food Science Texts Series. Boston: Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1463-7_7
- 128)** Nielsen, S. S. (2017). *Food Analysis* (S. S. Nielsen, Ed.; 5a edición). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-45776-5>
- 129)** Nishinari, K. (2004). Rheology, food texture and mastication. *Journal of Texture Studies*, 35(2), 113–124. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4603.2004.tb00828.x>
- 130)** Nitsch, J. P. (1953). THE PHYSIOLOGY OF FRUIT GROWTH. *Annual Review of Plant Physiology*, 4(1), 199–236.
- 131)** Nobel, P. S., Geller, G. N., Kee, S. C., & Zimmerman, A. D. (1986). Temperatures and thermal tolerance for cacti exposed to high temperatures near the soil surface. *Plant Cell Env.*, 9, 279–287.

- 132)** Olvera, M. A., Martínez, C. A., & Real, E. (1993). *MANUAL DE TÉCNICAS PARA LABORATORIO DE NUTRICIÓN DE PECES Y CRUSTÁCEOS*. Programa Cooperativo Gubernamental FAO – Italia. <https://www.fao.org/3/AB489S/AB489S00.htm#TOC>
- 133)** Owusu-Apenten, R., & Vieira, E. (2022). Quality and Sensory Evaluation of Food. En: *Elementary Food Science*. Food Science Text Series. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-65433-7_5
- 134)** Pagès, J. (2004). Multiple Factor Analysis: Main Features and Application to Sensory Data. *Revista Colombiana de Estadística*, 27(1), 1–26.
- 135)** Pastor, M. V., Costell, E., Izquierdo, L., & Durán, L. (1996). Perfil descriptivo de néctares de melocotón. Evaluación de jueces y de atributos con el análisis de Procrustes generalizado. *Food Science and Technology International*, 2(4), 219–230. <https://doi.org/10.1177/108201329600200404>
- 136)** Paucara, C. M. (2017). *CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y QUÍMICA DE LA TUNA (Opuntia ficus indica) EN EL MUNICIPIO DE LURIBAY PROVINCIA LOAYZA DEL DEPARTAMENTO DE LA PAZ*. [Tesis de Licenciatura, Universidad Mayor de San Andrés]. Repositorio Institucional UMSA.
- 137)** Pedrero, D. L., & Pangborn, R. M. (Eds.). (1989). *Evaluación sensorial de los alimentos. Métodos analíticos*. CDMX: Alhambra Mexicana.
- 138)** Pereira, J. C., Albertão, P. A., Aparecida, E., Sisto, M. H., Frankland, A. C. H., & Marucci, M. C. (2015). Flavonoid Contents and Antioxidant Activity in Fruit, Vegetables and Other Types of Food. *Agricultural Sciences*, 06(04), 426–435. <https://doi.org/10.4236/as.2015.64042>
- 139)** Piga, A. (2014). Cactus Pear: A Fruit of nutraceutical and functional importance. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, 6, 9–22. <https://doi.org/https://doi.org/10.56890/jpacd.v6i.294>
- 140)** Pimienta-Barrios, E. (1994). Prickly Pear (*Opuntia* spp.): a valuable fruit crop for the semi-arid lands of Mexico. *Journal of Arid Environments*, 28, 1–11.
- 141)** Pop, M., Lupea, A. X., Popa, S., & Gruescu, C. (2010). Colour of bilberry (*Vaccinium myrtillus* fruits) extracts. *International Journal of Food Properties*, 13(4), 771–777. <https://doi.org/10.1080/10942910902894898>

- 142) Ramírez-Ramos, M., García-Mateos, M. del R., Corrales-García, J., Ybarra-Moncada, C., & Castillo-González, A.M. (2015). COMPUESTOS ANTIOXIDANTES EN VARIEDADES PIGMENTADAS DE TUNA (*Opuntia* sp.). *Revista Fitotécnica Mexicana*, 38(4), 349–357. <https://doi.org/10.35196/rfm.2015.3.349>
- 143) Reynoso, R., Garcia, F. A., Morales, D., & Gonzalez De Mejia, E. (1997). Stability of Betalain Pigments from a Cactacea Fruit. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 45, 2884–2889.
- 144) Richar, A. R. (2010). *Comportamiento inicial de dos variedades de tuna (Opuntia ficus-indica) en dos localidades de Imbabura*. [Tesis de Pregrado, Universidad Técnica del Norte]. Repositorio Digital Universidad Técnica del Norte.
- 145) Rodríguez, F. (2022). *CORRELACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS SENSORIALES, TEXTURA Y COLOR DE PAPAS FRITAS COMERCIALES*. [Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México]. TESIUNAM.
- 146) Ross, J. A., & Kasum, C. M. (2002). Dietary flavonoids: Bioavailability, metabolic effects, and safety. *Annual Review of Nutrition*, 22, 19–34. <https://doi.org/10.1146/annurev.nutr.22.111401.144957>
- 147) Samah, S., Valadez-Moctezuma, E., Peláez-Luna, K. S., Morales-Manzano, S., Meza-Carrera, P., & Cid-Contreras, R. C. (2016). Genetic divergence between Mexican *Opuntia* accessions inferred by polymerase chain reaction-restriction fragment length polymorphism analysis. *Genetics and Molecular Research*, 15(2). <https://doi.org/10.4238/gmr.15027786>
- 148) Sanchez-Castillo, C. P., Dewey, P. J. S., Aguirre, A., Lara, J. J., Vaca, R., Leon De La Barra, P., Ortiz, M., Escamilla, I., & James, W. P. T. (1998). The Mineral Content of Mexican Fruits and Vegetables. *Journal of Food Composition and Analysis*, 11, 340–356. <https://doi.org/https://doi.org/10.1006/jfca.1998.0598>
- 149) Schaich, K. M. (2005). Lipid Oxidation: Theoretical Aspects. En F. Shahidi (Ed.), *Bailey's Industrial Oil and Fat Products* (6^a ed., Vol. 6, pp. 269–355). John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/047167849x.bio067>
- 150) Schaide, T., Cabrera-Bañegil, M., Pérez-Nevado, F., Esperilla, A., & Martín-Vertedor, D. (2019). Effect of olive leaf extract combined with *Saccharomyces cerevisiae*

- in the fermentation process of table olives. *Journal of Food Science and Technology*, 56(6), 3001–3013. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03782-x>
- 151)** Schirra, M., Inglese, P., & La Mantia, T. (1999). Quality of cactus pear (*Opuntia ficus-indica* Miller (L.)) fruits in relation to ripening time, CaCl₂ preharvest sprays and storage conditions. *Scientia Horticulturae* 1362, 1-12.
- 152)** Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural [SADER]. (2020). *Catálogo Nacional de Variedades Vegetales 2020* (pp. 90–92). Coyoacán, CDMX, México: Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas.
- 153)** Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural [SADER]. (2021, julio 18). *Inicia temporada de tuna mexicana*. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/inicia-temporada-de-tuna-mexicana>
- 154)** Secretaría de Economía. (2006). NMX-FF-030-SCFI-2006. PRODUCTOS ALIMENTICIOS NO INDUSTRIALIZADOS PARA USO HUMANO – FRUTA FRESCA – TUNA (*Opuntia* spp.) ESPECIFICACIONES. (NMX-FF-030-SCFI-2006). Diario Oficial de la Federación.
- 155)** Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT]. (2021, septiembre 18). *Día Nacional del Nopal*. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/dia-nacional-del-nopal>
- 156)** Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP]. (2023). *Avance de Siembras y Cosechas, Nacional 2022*. Gobierno de México. https://nube.siap.gob.mx/avance_agricola/
- 157)** Severiano-Pérez, P. (2019). ¿Qué es y cómo se utiliza la evaluación sensorial? What is and how is the sensory evaluation used? *INTERdisciplina*, 7(19), 47–68. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485705e.2019.19.70287>
- 158)** Severiano-Pérez, P., Gómez-Andrade, D. M., Méndez-Gallardo, C. I., Pedrero-Fuehrer, D. L., Gómez-Corona, C., Ríos-Díaz, S. T., Escamilla-Loeza, A., & Utrera-Andrade, M. (2019). *Manual de Evaluación Sensorial* (P. Severiano-Pérez, Ed.). CDMX: Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México.

- 159)** Shalaby, E. (Ed.). (2019). *Antioxidants*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.77838>
- 160)** Silva, M. A., Albuquerque, T. G., Pereira, P., Ramalho, R., Vicente, F., Oliveira, M. B. P. P., & Costa, H. S. (2021). *Opuntia ficus-indica* (L.) mill.: A multi-benefit potential to be exploited. *Molecules*, 26(4). <https://doi.org/10.3390/molecules26040951>
- 161)** Spiller, G. A. (Ed.). (2001). *CRC HANDBOOK OF Dietary Fiber in Human Nutrition* (3^a Edition). CRC Press.
- 162)** Stintzing, F. C., Schieber, A., & Carle, R. (2001). Phytochemical and nutritional significance of cactus pear. *European Food Research and Technology*, 212, 396–407.
- 163)** Stintzing, F. C., Schieber, A., & Carle, R. (2003). Evaluation of colour properties and chemical quality parameters of cactus juices. *European Food Research and Technology*, 216(4), 303–311. <https://doi.org/10.1007/s00217-002-0657-0>
- 164)** Stintzing, F. C., Herbach, K. M., Mosshammer, M. R., Carle, R., Yi, W., Sellappan, S., Akoh, C. C., Bunch, R., & Felker, P. (2005). Color, betalain pattern, and antioxidant properties of cactus pear (*Opuntia* spp.) clones. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53(2), 442–451. <https://doi.org/10.1021/jf048751y>
- 165)** Stone, H., & Sidel, J. L. (2004). *Sensory evaluation practices* (H. Stone & J. L. Sidel, Eds.; 3^a ed.). Elsevier Academic Press.
- 166)** Sumaya-Martínez, M. T., Suárez, T., Cruz, N. S., Alanís, E., & Sampedro, J. G. (2010). INNOVACION DE PRODUCTOS DE ALTO VALOR AGREGADO A PARTIR DE LA TUNA MEXICANA. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 27, 435–441. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=14114743013>
- 167)** Sumaya-Martínez, M. T., Cruz-Jaime, S., Madrigal-Santillán, E., García-Paredes, J. D., Cariño-Cortés, R., Cruz-Cansino, N., Valadez-Vega, C., Martinez-Cardenas, L., & Alanís-García, E. (2011). Betalain, acid ascorbic, phenolic contents and antioxidant properties of purple, red, yellow and white cactus pears. *International Journal of Molecular Sciences*, 12(10), 6452–6468. <https://doi.org/10.3390/ijms12106452>

- 168)** Szczesniak, A. S. (2002). Texture is a sensory property. *Food Quality and Preference*, *13*, 215–225. [https://doi.org/10.1016/S0950-3293\(01\)00039-8](https://doi.org/10.1016/S0950-3293(01)00039-8)
- 169)** Toivonen, P. M. A., & Brummell, D. A. (2008). Biochemical bases of appearance and texture changes in fresh-cut fruit and vegetables. *Postharvest Biology and Technology*, *48*(1), 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2007.09.004>
- 170)** Torres-Bojórquez, A. E., García-Rubio, O. R., Miranda-López, R., & Cardador-Martínez, A. (2017). Evaluación de la capacidad antioxidante, características fisicoquímicas y perfil sensorial de *Opuntia robusta* y *O. ficus-indica*. Archivos Latinoamericanos de Nutrición, *67*(4). <https://www.alanrevista.org/ediciones/2017/4/art-6/>
- 171)** Trumbo, P., Yates, A., Schlicker, S., & Poos, M. (2001). Dietary Reference Intakes: Vitamin A, Vitamin K, Arsenic, Boron, Chromium, Copper, Iodine, Iron, Manganese, Molybdenum, Nickel, Silicon, Vanadium, and Zinc. *Journal of the American Dietetic Association*, *101*(3), 294–301.
- 172)** Tucker, G. (1993). 1 Introducción. En: G. B. Seymour, J. E. Taylor, G. A. Tucker (Eds.). *Biochemistry of Fruit Ripening* (pp. 1–51). Dordrecht: Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-011-1584-1>
- 173)** Tunick, M. H. (2011). Food texture analysis in the 21st century. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *59*(5), 1477–1480. <https://doi.org/10.1021/jf1021994>
- 174)** Unidad de Inteligencia Comercial. (2021). *Análisis de Mercado Tuna 2015 - 2021*. Perú: Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego.
- 175)** Väkeväinen, K., Hernández, J., Simontaival, A. I., Severiano-Pérez, P., Díaz-Ruiz, G., von Wright, A., Wachter-Rodarte, C., & Plumed-Ferrer, C. (2020). Effect of different starter cultures on the sensory properties and microbiological quality of Atole agrio, a fermented maize product. *Food Control*, *109*(106907), 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.106907>
- 176)** Valdez-Fragoso, A., Soto-Caballero, M. C., Blanda, G., Welti-Chanes, J., & Mújica-Paz, H. (2009). FIRMNESS CHANGES OF IMPREGNATED WHOLE PEELED PRICKLY PEAR. *Journal of Texture Studies*, *40*, 571–583.

- 177)** Valero-Galván, J., González-Fernández, R., Sigala-Hernández, A., Núñez-Gastélum, J. A., Ruiz-May, E., Rodrigo-García, J., Larqué-Saavedra, A., & Martínez-Ruiz, N. del R. (2021). Sensory attributes, physicochemical and antioxidant characteristics, and protein profile of wild prickly pear fruits (*O. macrocentra* Engelm., *O. phaeacantha* Engelm., and *O. engelmannii* Salm-Dyck ex Engelmann.) and commercial prickly pear fruits (*O. ficus-indica* (L.) Mill.). *Food Research International*, 140. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109909>
- 178)** Van Buggenhout, S., Sila, D. N., Duvetter, T., Van Loey, A., & Hendrickx, M. (2009). Pectins in processed fruits and vegetables: Part III—Texture engineering. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 8(2), 105–117. <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2009.00072.x>
- 179)** Vázquez, J. A. (2012). *ESTUDIO DEL EFECTO DE CAPSAICINOIDES EN LA TEXTURA Y ESTRUCTURA MICROSCÓPICA DE GELES*. [Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México]. TESIUNAM.
- 180)** Villaño, D., García-Viguera, C., & Mena, P. (2016). Colors: Health Effects. En B. Caballero, P. M. Finglas, & F. Toldrá (Eds.), *Encyclopedia of Food and Health* (pp. 265–272). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384947-2.00190-2>
- 181)** Vit, P., Deliza, R., & Pérez, A. (2011). How a Huottuja (Piaroa) community perceives genuine and false honey from the Venezuelan Amazon, by free-choice profile sensory method. *Revista Brasileira de Farmacognosia*, 21(5), 786-792. <https://doi.org/10.1590/S0102-695X2011005000115>
- 182)** Vizcarra, B. F. (2017). *EVALUACIÓN DE MADURACIÓN Y CARACTERÍSTICAS SENSORIALES EN POST COSECHA DE TUNA VARIEDAD AMARILLA (Opuntia ficus indica) EN CONDICIONES DE ALMACENAMIENTO EN EL CENTRO POBLADO DE SAN CRISTÓBAL REGIÓN MOQUEGUA*. [Tesis de Licenciatura, Universidad José Carlos Mariátegui]. Repositorio Institucional – UJCM.
- 183)** Wang, S. Y., & Camp, M. J. (2000). Temperatures after bloom affect plant growth and fruit quality of strawberry. *Scientia Horticulturae*, 85, 183–199.

- 184)** Waterman, P. G., & Mole, S. (1994). *Analysis of phenolic plant metabolites*. Oxford: Blackwell Scientific Publications.
- 185)** Williams, A., & Langron, S. P. (1984). The of free-choice profiling for the evaluation of commercial ports. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 35(5), 558-568. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740350513>
- 186)** XLSTAT. (s.f.). *Multiple factor analysis (MFA)*. Addinsoft. <https://www.xlstat.com/en/solutions/features/multiple-factor-analysis-mfa>
- 187)** Xu, B. J., Yuan, S. H., & Chang, S. K. C. (2007). Comparative analyses of phenolic composition, antioxidant capacity, and color of cool season legumes and other selected food legumes. *Journal of Food Science*, 72(2). <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2006.00261.x>
- 188)** Yao, L. H., Jiang, Y. M., Shi, J., Tomás-Barberán, F. A., Datta, N., Singanusong, R., & Chen, S. S. (2004). Flavonoids in Food and Their Health Benefits. *Plant Foods for Human Nutrition*, 59, 113–122.
- 189)** Zang, S., Tian, S., Jiang, J., Han, D., Yu, X., Wang, K., Li, D., Lu, D., Yu, A., & Zhang, Z. (2017). Determination of antioxidant capacity of diverse fruits by electron spin resonance (ESR) and UV–vis spectrometries. *Food Chemistry*, 221, 1221–1225. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.11.036>
- 190)** Zavaleta, J., Muñoz, A. M., Blanco, T., Alvarado-Ortiz, C., & Loja, B. (2005). Capacidad antioxidante y principales ácidos fenólicos y flavonoides de algunos alimentos. *Horizonte Médico*, 5(2). <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=371637113004>
- 191)** Zegbe-Domínguez, J. A., Guillermo García, D., & Daniel Gámez Cardoza, V. (2021). REVALORACIÓN DE PÉRDIDA DE MASA Y CALIDAD POSTCOSECHA DE LA TUNA. *XI Reunión Nacional de Investigación Agrícola. Memoria*, 10–12.
- 192)** Zenteno-Ramírez, G., Juárez-Flores, B. I., Rogelio Aguirre-Rivera, J. R., Ortiz-Pérez, M. D., Zamora-Pedraza, C., & Rendón-Huerta, J. A. (2015). EVALUACIÓN DE AZÚCARES Y FIBRA SOLUBLE EN EL JUGO DE VARIANTES DE TUNAS (*Opuntia* spp.). *Agrociencia*, 48, 141–152.

10. ANEXOS

Anexo 1. Macrocomponentes y contenido de azúcares reductores en variedades de tuna (*Opuntia* spp.) del Altiplano Mexicano y del Valle de Teotihuacán, en base seca (g/100 g_{bs}).

Origen	Variedad	Proteína Cruda	Lípidos Crudos	Fibra Cruda	Cenizas	ELN	Azúcares Reductores
	Cristalina	5.19 ± 0.05 de	7.37 ± 0.26 g	10.62 ± 0.40 a	1.84 ± 0.07 hi	74.99 ± 0.16 bcd	28.850 ± 2.034 a
	Amarilla Montesa	5.56 ± 0.03 e	5.07 ± 0.32 e	15.75 ± 0.82 bc	1.80 ± 0.06 gh	71.82 ± 1.22 bc	57.358 ± 2.977 g
	Amarilla Venado	4.88 ± 0.29 cd	5.37 ± 0.25 e	17.40 ± 0.18 cd	2.50 ± 0.09 fg	69.84 ± 0.63 fgh	43.117 ± 1.338 e
SLP	Cardona	5.31 ± 0.14 e	5.21 ± 0.28 e	24.41 ± 0.08 e	2.58 ± 0.07 cd	62.50 ± 0.42 h	29.823 ± 1.237 ab
	Roja Pelona	3.42 ± 0.14 a	1.01 ± 0.01 a	33.30 ± 2.67 g	1.51 ± 0.07 bc	60.76 ± 2.86 ab	37.912 ± 0.880 cd
	“ Naranjona”	3.35 ± 0.18 a	1.44 ± 0.09 a	27.94 ± 1.30 f	2.53 ± 0.17 de	64.75 ± 1.40 gh	36.479 ± 0.351 c
	Charola	6.13 ± 0.04 f	7.84 ± 0.81 g	28.51 ± 0.11 f	1.89 ± 0.05 a	55.64 ± 0.71 cde	31.472 ± 0.384 b
	Reyna 1	3.56 ± 0.18 a	6.49 ± 0.02 f	13.24 ± 0.71 b	1.44 ± 0.13 i	75.27 ± 1.04 a	35.810 ± 0.335 c
	Reyna 2	4.02 ± 0.15 b	3.80 ± 0.17 cd	17.49 ± 0.74 cd	1.76 ± 0.04 ghi	72.93 ± 0.67 abc	46.873 ± 0.944 f
Edomex	Pico Chulo	4.70 ± 0.08 c	4.40 ± 0.14 d	27.29 ± 0.46 f	1.71 ± 0.11 cd	61.90 ± 0.51 abc	43.805 ± 0.422 e
	Roja San Martín	6.57 ± 0.33 g	2.42 ± 0.41 b	22.06 ± 1.83 e	2.19 ± 0.39 ef	66.75 ± 2.96 efg	43.603 ± 1.395 e
	Amarillo Plátano	4.56 ± 0.33 c	6.13 ± 0.23 f	29.27 ± 0.00 f	2.18 ± 0.01 ab	57.86 ± 0.11 def	38.711 ± 0.180 d
Tamps.	Amarilla Miquihuana	4.04 ± 0.10 b	3.18 ± 0.00 c	19.15 ± 1.90 d	2.54 ± 0.29 g	71.09 ± 2.28 h	44.066 ± 0.411 e

* Los resultados son valores promedio de 2 réplicas para el AQP y 3 réplicas para azúcares reductores por cada muestra evaluada.

** Calculado a partir de la materia seca presente en cada muestra.

*** Distintas letras indican diferencia estadísticamente significativa entre las muestras, $\alpha = 0.05$ ($p < 0.05$).

Anexo 2. Perfil de minerales (mg/kg) presentes en pulpa de variedades de tuna (*Opuntia* spp.) del Altiplano Mexicano y del Valle de Teotihuacán.

Origen	Variedad	Ca	K	Zn	P	Fe	Se (ng/g)	Cu
	Cristalina	376.220 ± 3.811 e	1.512 ± 0.038 b	5.061 ± 0.091 cd	0.160 ± 0.104 b	11.635 ± 2.829 ef	35.113 ± 3.595 cd	2.513 ± 0.465 abc
	Amarilla Montesa	152.407 ± 2.852 b	1.068 ± 0.012 a	3.725 ± 0.128 b	ND a	6.437 ± 1.093 c	23.263 ± 1.262 ab	0.486 ± 0.000 a
	Amarilla Venado	386.240 ± 14.539 e	1.446 ± 0.044 b	3.882 ± 0.128 b	ND a	12.115 ± 1.091 efg	26.877 ± 1.851 b	1.094 ± 0.776 ab
SLP	Cardona	642.591 ± 27.196 g	2.095 ± 0.082 c	5.406 ± 0.197 cde	0.566 ± 0.067 c	9.535 ± 1.526 de	112.770 ± 7.837 h	3.128 ± 0.417 bc
	Roja Pelona	307.304 ± 6.050 d	2.136 ± 0.121 c	5.614 ± 0.188 def	0.030 ± 0.000 a	3.52 ± 0.001 ab	39.033 ± 3.142 de	2.772 ± 0.402 bc
	“ Naranjona”	636.780 ± 8.690 g	2.584 ± 0.056 d	2.688 ± 0.237 a	0.030 ± 0.000 a	3.511 ± 0.001 ab	32.573 ± 2.419 c	2.165 ± 0.000 ab
	Charola	492.810 ± 7.728 f	0.348 ± 0.013 ab	3.865 ± 0.093 b	0.500 ± 0.020 c	12.83 ± 0.012 fg	48.593 ± 2.485 g	4.675 ± 0.006 c
	Reyna 1	1258.621 ± 20.235 h	8.427 ± 0.749 e	15.457 ± 0.685 h	1.269 ± 0.053 e	30.539 ± 3.457 h	43.723 ± 2.990 efg	9.716 ± 5.473 d
	Reyna 2	153.624 ± 4.812 b	1.340 ± 0.013 ab	6.221 ± 0.680 g	0.496 ± 0.084 c	8.393 ± 2.846 cd	44.420 ± 2.744 fg	0.788 ± 0.506 a
Edomex	Pico Chulo	152.267 ± 9.549 b	1.376 ± 0.020 b	5.680 ± 0.178 efg	0.030 ± 0.000 a	14.418 ± 1.385 g	19.270 ± 1.342 a	3.045 ± 0.001 bc
	Roja San Martín	188.493 ± 7.195 c	1.370 ± 0.012 ab	5.976 ± 0.851 fg	0.744 ± 0.129 d	3.483 ± 0.001 ab	41.287 ± 2.113 ef	0.353 ± 0.509 a
	Amarillo Plátano	85.546 ± 1.912 a	1.212 ± 0.015 ab	3.703 ± 0.253 b	ND a	3.299 ± 0.941 a	38.534 ± 1.914 de	1.743 ± 0.002 ab
Tamps-	Amarilla Miquihuana	201.310 ± 3.963 c	1.473 ± 0.051 b	5.013 ± 0.177 c	0.680 ± 0.023 d	6.030 ± 2.783 bc	34.697 ± 1.953 cd	2.230 ± 0.000 ab

* Los resultados son valores promedio de 4 réplicas por cada muestra evaluada.

** Distintas letras indican diferencia estadísticamente significativa entre las muestras, $\alpha = 0.05$ ($p < 0.05$).

*** ND: No Detectable.

Anexo 3. Perfil de minerales en base seca (mg/100 g_{bs}) presentes en pulpa de variedades de tuna (*Opuntia* spp.) del Altiplano Mexicano y del Valle de Teotihuacán.

Origen	Variedad	Ca	K	Zn	P	Fe	Se (µg/100 g _{bs})	Cu
SLP	Cristalina	186.710 ± 1.891 e	0.751 ± 0.019 bc	2.512 ± 0.045 c	0.080 ± 0.052 b	5.774 ± 1.404 ef	3.511 ± 0.359 c	1.247 ± 0.231 abc
	Amarilla Montesa	83.011 ± 1.553 b	0.582 ± 0.006 a	2.029 ± 0.070 b	ND a	3.506 ± 0.595 cd	2.326 ± 0.126 b	0.265 ± 0.000 a
	Amarilla Venado	199.401 ± 7.506 f	0.747 ± 0.023 bc	2.004 ± 0.066 b	ND a	6.255 ± 0.563 fg	2.688 ± 0.185 b	0.565 ± 0.401 ab
	Cardona	312.696 ± 13.234 h	1.019 ± 0.040 d	2.631 ± 0.096 cd	0.275 ± 0.033 c	4.640 ± 0.743 de	11.277 ± 0.784 g	1.522 ± 0.203 bc
	Roja Pelona	152.055 ± 2.993 d	1.057 ± 0.060 d	2.778 ± 0.093 cd	0.015 ± 0.000 a	1.742 ± 0.001 a	3.903 ± 0.314 cd	1.372 ± 0.199 bc
	“ Naranjona”	338.713 ± 4.622 i	1.374 ± 0.030 e	1.430 ± 0.126 a	0.016 ± 0.000 a	1.868 ± 0.001 a	3.257 ± 0.242 c	1.151 ± 0.000 abc
	Charola	235.344 ± 3.690 g	0.644 ± 0.006 abc	1.846 ± 0.044 b	0.239 ± 0.010 c	6.127 ± 0.006 fg	4.859 ± 0.249 f	2.233 ± 0.003 c
Edomex	Reyna 1	623.08 ± 10.017 j	4.172 ± 0.371 f	7.652 ± 0.339 g	0.628 ± 0.026 f	15.118 ± 1.711 h	4.372 ± 0.299 def	4.810 ± 2.709 d
	Reyna 2	76.774 ± 2.405 b	0.670 ± 0.006 abc	3.109 ± 0.340 ef	0.248 ± 0.042 c	4.194 ± 1.422 cd	4.442 ± 0.274 ef	0.394 ± 0.253 a
	Pico Chulo	77.807 ± 4.880 b	0.703 ± 0.010 abc	2.903 ± 0.091 de	0.015 ± 0.000 a	7.367 ± 0.708 g	1.927 ± 0.134 a	1.556 ± 0.000 bc
	Roja San Martín	106.493 ± 4.065 c	0.774 ± 0.007 bc	3.376 ± 0.481 f	0.420 ± 0.073 e	1.968 ± 0.000 ab	4.129 ± 0.211 f	0.199 ± 0.288 a
	Amarillo Plátano	44.301 ± 0.990 a	0.628 ± 0.008 ab	1.918 ± 0.131 b	ND a	1.709 ± 0.487 a	3.853 ± 0.191 cde	0.903 ± 0.001 ab
Tamps-	Amarilla Miquihuana	108.464 ± 2.135 c	0.793 ± 0.027 c	2.701 ± 0.095 cd	0.366 ± 0.012 d	3.249 ± 1.499 bc	3.470 ± 0.195 c	1.202 ± 0.000 abc

* Los resultados son valores promedio de 4 réplicas por cada muestra evaluada.
 ** Calculado a partir de la materia seca presente en cada muestra.
 *** Distintas letras indican diferencia estadísticamente significativa entre las muestras, $\alpha = 0.05$ ($p < 0.05$).
 **** ND: No Detectable.

Anexo 4. Dimensiones (mm) de variedades de tuna (*Opuntia* spp.) del Altiplano Mexicano y del Valle de Teotihuacán, en fruto entera (con cáscara), grosor de la cáscara, y dimensiones de la pulpa (sin cáscara).

Origen	Variedad	Fruto Entero			Cáscara	Pulpa		
		Polar	Ecuatorial Mayor (EEMa)	Ecuatorial Menor (EEme)	Grosor	Polar	Ecuatorial Mayor (EEMa)	Ecuatorial Menor (EEme)
SLP	Cristalina	82.410 ± 8.422 d	53.545 ± 5.058 cd	48.985 ± 5.818 bc	5.105 ± 0.983 bcd	63.720 ± 8.989 cde	46.440 ± 6.512 cde	39.250 ± 4.624 c
	Amarilla Montesa	83.420 ± 10.711 d	45.840 ± 3.456 a	42.620 ± 3.630 a	2.865 ± 1.118 a	62.680 ± 8.579 cd	39.640 ± 3.904 b	34.635 ± 3.206 b
	Amarilla Venado	82.520 ± 5.046 d	55.780 ± 4.783 d	48.955 ± 4.339 b	4.630 ± 1.017 b	59.860 ± 5.258 c	45.000 ± 4.277 c	39.105 ± 4.084 c
	Cardona	51.434 ± 6.532 a	46.970 ± 2.633 ab	44.680 ± 3.149 a	5.050 ± 1.950 bcd	35.340 ± 9.077 a	34.345 ± 2.498 a	31.145 ± 2.000 a
	Roja Pelona	77.220 ± 8.040 cd	55.515 ± 4.270 d	49.600 ± 1.645 bc	4.510 ± 0.987 b	63.425 ± 4.793 cde	47.075 ± 1.909 cdef	38.950 ± 2.822 c
	“ Naranjona”	78.855 ± 7.190 cd	60.175 ± 4.151 ef	52.250 ± 2.983 cde	4.835 ± 1.511 bc	60.280 ± 6.499 cd	50.990 ± 2.002 ef- g	40.155 ± 4.182 c
	Charola	59.390 ± 9.778 b	48.025 ± 4.541 ab	43.375 ± 3.788 a	5.200 ± 1.549 bcd	45.360 ± 6.747 b	37.530 ± 4.697 ab	31.160 ± 4.609 a
Edomex	Reyna 1	74.250 ± 6.414 c	53.235 ± 4.632 cd	48.280 ± 3.701 b	5.195 ± 0.986 bcd	62.525 ± 4.482 cd	47.950 ± 6.038 cdef	40.560 ± 3.566 cd
	Reyna 2	94.575 ± 10.470 ef	60.745 ± 3.992 f	54.325 ± 2.985 e	6.065 ± 1.744 d	75.205 ± 5.785 f	53.875 ± 3.878 g	43.955 ± 3.221 e
	Pico Chulo	82.020 ± 6.451 d	50.595 ± 6.795 bc	43.870 ± 2.470 a	3.145 ± 0.805 a	66.105 ± 23.039 cde	45.845 ± 13.667 cd	45.380 ± 2.813 e
	Roja San Martín	92.140 ± 6.320 e	59.960 ± 2.534 ef	52.945 ± 2.162 de	5.880 ± 0.547 cd	71.210 ± 3.718 ef	50.175 ± 2.855 defg	40.380 ± 2.269 c
	Amarillo Plátano	101.785 ± 6.922 f	61.085 ± 2.809 f	55.465 ± 2.954 e	4.760 ± 1.374 bc	84.630 ± 3.635 g	51.680 ± 2.924 fg	44.900 ± 2.885 e
Tamps.	Amarilla Miquihuana	96.515 ± 12.649 ef	56.375 ± 5.425 de	50.790 ± 5.816 bcd	5.225 ± 1.382 bcd	68.045 ± 4.555 def	49.330 ± 3.491 cdefg	43.575 ± 4.302 de

* Los resultados son valores promedio de 10 réplicas por cada muestra evaluada

** Distintas letras indican diferencia estadísticamente significativa entre las muestras, $\alpha = 0.05$ ($p < 0.05$).

Anexo 5. Capacidad antioxidante, base seca, en pulpa de tunas (*Opuntia* spp.) del Altiplano Mexicano y del Valle de Teotihuacán, en mg EAA/g_{bs}.

Origen	Variedad	Capacidad Antioxidante (mg EAA/100 g _{bs})
SLP	Cristalina	270.581 ± 20.736 b
	Amarilla Montesa	287.010 ± 23.091 bcd
	Amarilla Venado	304.629 ± 7.981 cde
	Cardona	339.064 ± 18.262 fg
	Roja Pelona	362.245 ± 12.532 ghi
	"Naranjona"	393.825 ± 17.839 i
	Charola	359.382 ± 9.778 gh
Edomex	Reyna 1	233.680 ± 10.934 a
	Reyna 2	212.208 ± 18.226 a
	Pico Chulo	335.491 ± 25.261 efg
	Roja San Martín	380.585 ± 38.406 hi
	Amarillo Plátano	278.798 ± 7.771 bc
Tamps.	Amarilla Miquihuana	315.152 ± 17.080 def

* Los resultados son valores promedio de 3 réplicas por cada muestra evaluada.

** Calculado a partir de la materia seca presente en cada muestra.

*** Distintas letras indican diferencia estadísticamente significativa entre las muestras, $\alpha = 0.05$ ($p < 0.05$).

Anexo 6. Ejemplo de forma de evaluación presentada ante los jueces durante la realización del perfil flash de las muestras de tuna (*Opuntia* spp.) del Altiplano Mexicano y del Valle de Teotihuacán, en el Laboratorio de Investigación de Evaluación Sensorial.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
Facultad de Química
Laboratorio de Investigación de Evaluación Sensorial



Forma de Evaluación

10/08/2022

INSTRUCCIONES

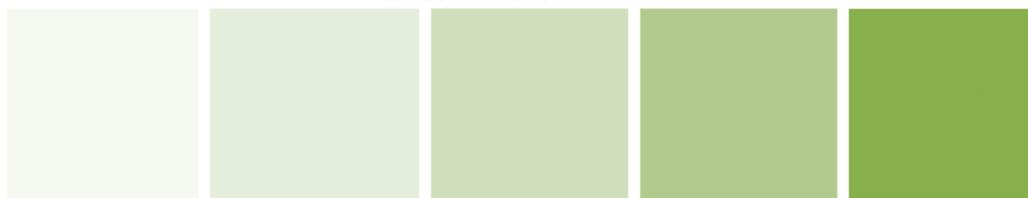
A continuación, se le presentan las instrucciones para la forma de evaluación de los atributos en tuna (perfil), dependiendo de aquellos presentados en el cuestionario **según la muestra**.

Aspecto

Observe la muestra sobre el plato.

1. Color

Blanco - Verde claro



Amarillo - Naranja



2. Superficie
3. Brillo
4. Homogeneidad
5. Color de las semillas
6. Tamaño de las semillas
7. Cantidad de semillas

Olor

Tome la muestra, acérquela a 3 cm de su nariz y perciba los olores que desprende en el orden presentado.

- | | | |
|---------------|-------------|------------|
| 1. Nota verde | 5. Cítrico | 9. Manzana |
| 2. Dulce | 6. Pepino | 10. Nopal |
| 3. Ácido | 7. Jitomate | 11. Tuna |
| 4. Fermentado | 8. Frutal | 12. Fresco |

Textura

1. **Dureza:** ponga la muestra entre sus dientes incisivos y muerda, la fuerza requerida para penetrar la muestra es la dureza.
2. **Crujiente:** escuche el sonido que produce la muestra cuando la empieza a masticar.
3. **Cohesividad:** al morder la muestra, qué tan compacta se percibe esta.
4. **Jugosidad:** observe la cantidad de líquido que desprendió la muestra cuando la mordió para evaluar la dureza, esa sensación es la jugosidad.
5. **Viscosidad:** es el cuerpo que tiene el jugo de la tuna.
6. **Consistencia babosa:** tome un pedacito de muestra entre dos dedos y vea la sensación de pegajosidad en la mano.
7. **Fibrosidad:** es la cantidad de fibras que se perciben al masticar la muestra.
8. **Granulosidad:** note la cantidad de partículas y semillas que presenta la muestra después de 3 mordidas.
9. **Aterciopelado:** sensación suave y cremosa en la boca.
10. **Masticabilidad:** cuente la cantidad de veces que tiene que masticar la muestra para poderla deglutir, si la mastica 5 veces el valor será 4 en la escala. Todo esto como referencia para evaluar la intensidad de la masticabilidad.
11. **Adhesividad:** note la cantidad de muestra que se queda adherida a dientes y paladar tras deglutir.

Sabor

Después de evaluar la textura, tome otra mordida de tuna y preste atención a las notas de sabor que perciba, y a su intensidad.

- | | | |
|-----------|------------|----------------|
| 1. Ácido | 6. Sandía | 11. Jitomate |
| 2. Dulce | 7. Papaya | 12. Nopal |
| 3. Amargo | 8. Manzana | 13. Tuna |
| 4. Salado | 9. Frutal | 14. Floral |
| 5. Pera | 10. Pepino | 15. Nota verde |

Resabio

Los resabios se evaluarán después de haber tragado la muestra:

1. **Astringente:** es la sensación de pesadez o sequedad que deja en la boca.
2. **Amargo:** es la percepción en la garganta de gusto amargo.
3. **Metálico:** es la percepción en la garganta de sabor metálico.

¡Muchas gracias!

Anexo 7. Ejemplo de cuestionario de perfil flash de muestras de tuna (*Opuntia* spp.) del Altiplano Mexicano y del Valle de Teotihuacán, elaborado en Fizz Acquisition presentado ante los jueces en el Laboratorio de Investigación de Evaluación Sensorial.

Bienvenido al Laboratorio de Evaluación Sensorial

Por favor, selecciona tu nombre

Aguilera Ocaña Vivian

USTED HA SELECCIONADO EL SIGUIENTE NOMBRE:

Aguilera Ocaña Vivian

presiona **página siguiente** para continuar,
o presiona **página anterior** para modificar tu elección.

PERFIL FLASH DE TUNAS

INSTRUCCIONES:

Por favor, evalúe la intensidad de los atributos que perciba en las muestras de tuna, de acuerdo con las indicaciones previamente enviadas, en el orden presentado del grupo de atributos: aspecto, olor, textura, sabor y resabio.

Si tiene alguna duda no dude en llamar al coordinador de la prueba.

PERFIL FLASH DE TUNAS

Apariencia

Color: Naranja (0) a Granate (9) **952**

Superficie: Lisa (0) a Rugosa (9)

Brillo: Opaco (0) a Brillante (9)

PERFIL FLASH DE TUNAS

Apariencia

Homogeneidad: Homógeno (0) a Heterogéneo (9) **952**

Color de las semillas: Rojo oscuro (0) a Negro (9)

NOTA

Por favor, indique en el recuadro su criterio para la calificación de intensidad en homogeneidad.

[Empty input box]

Apariencia

Tamaño de las semillas

Cantidad de las semillas

PERFIL FLASH DE TUNAS

Pequeña Grande

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9

Poca Mucha

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9

952

Página anterior

Página Siguiente

Olor

Nota verde

Dulce

Ácido

Cítrico

Sandía

PERFIL FLASH DE TUNAS

Suave Intenso

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9

Suave Intenso

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9

Suave Intenso

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9

Suave Intenso

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9

952

Página anterior

Página Siguiente

Olor

Melón

Frutal

PERFIL FLASH DE TUNAS

Suave Intenso

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9

Suave Intenso

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9

NOTA

Por favor, indique en el recuadro si reconoció alguna nota en específico dentro del olor frutal.

952

Página anterior

Página Siguiente

Olor

Nopal

Tuna

Floral

Fresco

PERFIL FLASH DE TUNAS

Suave Intenso

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9

Suave Intenso

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9

Suave Intenso

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9

Suave Intenso

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9

952

Página anterior

Página Siguiente

Textura

Dureza

Cohesividad

Jugosidad

Consistencia babosa

PERFIL FLASH DE TUNAS

Suave Duro

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9

Sueta Compacta

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9

Seco Jugoso

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9

Poca Mucha

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9

952

Página anterior

Página Siguiente

Textura

Fibrosidad

Granulosidad

Masticabilidad

PERFIL FLASH DE TUNAS

Poca Mucha

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9

Baja Alta

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9

Baja Alta

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9

952

Página anterior

Página Siguiente

Sabor

Ácido

Dulce

Amargo

Miel

Sandía

PERFIL FLASH DE TUNAS

Suave Intenso

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9

Suave Intenso

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9

Suave Intenso

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9

Suave Intenso

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9

Suave Intenso

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9

952

Página anterior

Página Siguiente

Sabor

Frutos rojos

Frutal

PERFIL FLASH DE TUNAS

Suave Intenso

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9

Suave Intenso

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9

NOTA

Por favor, indique en el recuadro si reconoció alguna nota en específico dentro del olor frutal.

952

Página anterior

Página Siguiente

Sabor

PERFIL FLASH DE TUNAS

Floral Suave Intenso **420**

Nopal Suave Intenso

Tuna Suave Intenso

Nota verde Suave Intenso

Fresco Suave Intenso

[Pagina anterior](#) [Pagina Siguiente](#)

Resabio

PERFIL FLASH DE TUNAS

Astringente Poco Mucho **420**

Metálico Poco Mucho

[Pagina anterior](#) [Pagina Siguiente](#)

PERFIL FLASH DE TUNAS

Por favor, enjuague su paladar con una galleta habanera y un poco de agua antes de la siguiente muestra.

01:00

[Pagina anterior](#) [Pagina Siguiente](#)

Apariencia

PERFIL FLASH DE TUNAS

Color Amarillo Naranja **420**

Superficie Lisa Rugosa

Brillo Opaco Brillante

[Pagina anterior](#) [Pagina Siguiente](#)

Apariencia

PERFIL FLASH DE TUNAS

Homogeneidad Homogéneo Heterogéneo **420**

Color de semillas Rojo oscuro Negro

NOTA

Por favor, indique en el recuadro su criterio para la calificación de intensidad en homogeneidad.

[Pagina anterior](#) [Pagina Siguiente](#)

Apariencia

PERFIL FLASH DE TUNAS

Tamaño de semillas Pequeña Grande **420**

Cantidad de semillas Poca Mucha

[Pagina anterior](#) [Pagina Siguiente](#)

Olor

PERFIL FLASH DE TUNAS

Nota verde Suave Intenso **420**

Dulce Suave Intenso

Ácido Suave Intenso

Citríco Suave Intenso

Papaya Suave Intenso

[Pagina anterior](#) [Pagina Siguiente](#)

Olor

PERFIL FLASH DE TUNAS

Melón Suave Intenso **420**

Sandía Suave Intenso

Fruital Suave Intenso

NOTA

Por favor, indique en el recuadro si reconoció alguna nota en específico dentro del olor frutal.

[Pagina anterior](#) [Pagina Siguiente](#)

PERFIL FLASH DE TUNAS

Olor

Floral: Suave 0-9 Intenso

Nopal: Suave 0-9 Intenso

Fresco: Suave 0-9 Intenso

420

[Pagina anterior](#) [Pagina Siguiente](#)

PERFIL FLASH DE TUNAS

Textura

Dureza: Suave 0-9 Dura

Crujiente: Poco 0-9 Mucho

Cohesividad: Suelta 0-9 Compacta

420

[Pagina anterior](#) [Pagina Siguiente](#)

PERFIL FLASH DE TUNAS

Textura

Jugosidad: Seco 0-9 Jugoso

Granulosidad: Baja 0-9 Alta

Masticabilidad: Baja 0-9 Alta

420

[Pagina anterior](#) [Pagina Siguiente](#)

PERFIL FLASH DE TUNAS

Sabor

Ácido: Suave 0-9 Intenso

Dulce: Suave 0-9 Intenso

Amargo: Suave 0-9 Intenso

Citrico: Suave 0-9 Intenso

420

[Pagina anterior](#) [Pagina Siguiente](#)

PERFIL FLASH DE TUNAS

Sabor

Miel: Suave 0-9 Intenso

Melón: Suave 0-9 Intenso

Sandía: Suave 0-9 Intenso

420

[Pagina anterior](#) [Pagina Siguiente](#)

PERFIL FLASH DE TUNAS

Sabor

Papaya: Suave 0-9 Intenso

Frutal: Suave 0-9 Intenso

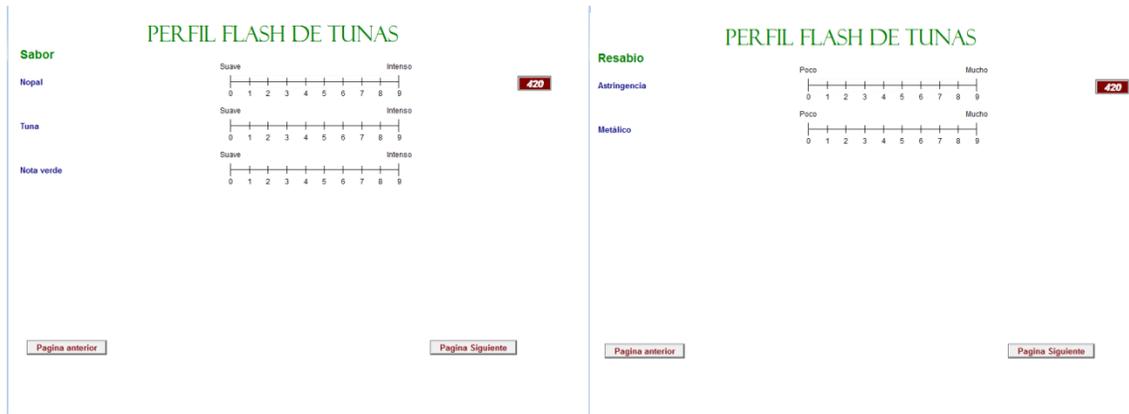
420

[Pagina anterior](#) [Pagina Siguiente](#)

NOTA

Por favor, indique en el recuadro si reconoció alguna nota en específico dentro del sabor frutal.

Caracterización de tunas (*Opuntia* spp.) del Valle de Teotihuacán y del Altiplano Mexicano: parámetros físicos, fisicoquímicos y perfil sensorial



¡Gracias por participar!

Anexo 8. Fotografías de tuna Reyna 1 (*Opuntia albicarpa* Sheinvar) analizada del Valle de Teotihuacán en el Laboratorio de Investigación de Evaluación Sensorial.



Autor: Alejandro Oros.

Anexo 9. Fotografías de tuna Cristalina (*Opuntia albicarpa* Sheinvar) analizada del Altiplano Mexicano en el Laboratorio de Investigación de Evaluación Sensorial.



Autor: Alejandro Oros.

Anexo 10. Fotografías de tuna Amarilla Montesa (*Opuntia megacantha*) analizada del Altiplano Mexicano en el Laboratorio de Investigación de Evaluación Sensorial.



Autor: Alejandro Oros.

Anexo 11. Fotografías de tuna Amarilla Venado (*Opuntia megacantha*) analizada del Altiplano Mexicano en el Laboratorio de Investigación de Evaluación Sensorial.



Autor: Alejandro Oros.

Anexo 12. Fotografías de tuna Pico Chulo (*Opuntia megacantha*) analizada del Valle de Teotihuacán en el Laboratorio de Investigación de Evaluación Sensorial.



Autor: Alejandro Oros.

Anexo 13. Fotografías de tuna Cardona (*Opuntia streptacantha*) analizada del Altiplano Mexicano en el Laboratorio de Investigación de Evaluación Sensorial.



Autor: Alejandro Oros.

Anexo 14. Fotografías de tuna Reyna 2 (*Opuntia albicarpa* Sheinvar) analizada del Valle de Teotihuacán en el Laboratorio de Investigación de Evaluación Sensorial.



Autor: Paola Villanueva & Alejandro Oros.

Anexo 15. Fotografías de tuna Roja San Martín (*Opuntia megacantha*) analizada del Valle de Teotihuacán en el Laboratorio de Investigación de Evaluación Sensorial.



Autor: Paola Villanueva & Alejandro Oros.

Anexo 16. Fotografías de tuna Amarilla Miquihuana (*Opuntia lasiocantha*) analizada del Altiplano Mexicano en el Laboratorio de Investigación de Evaluación Sensorial.



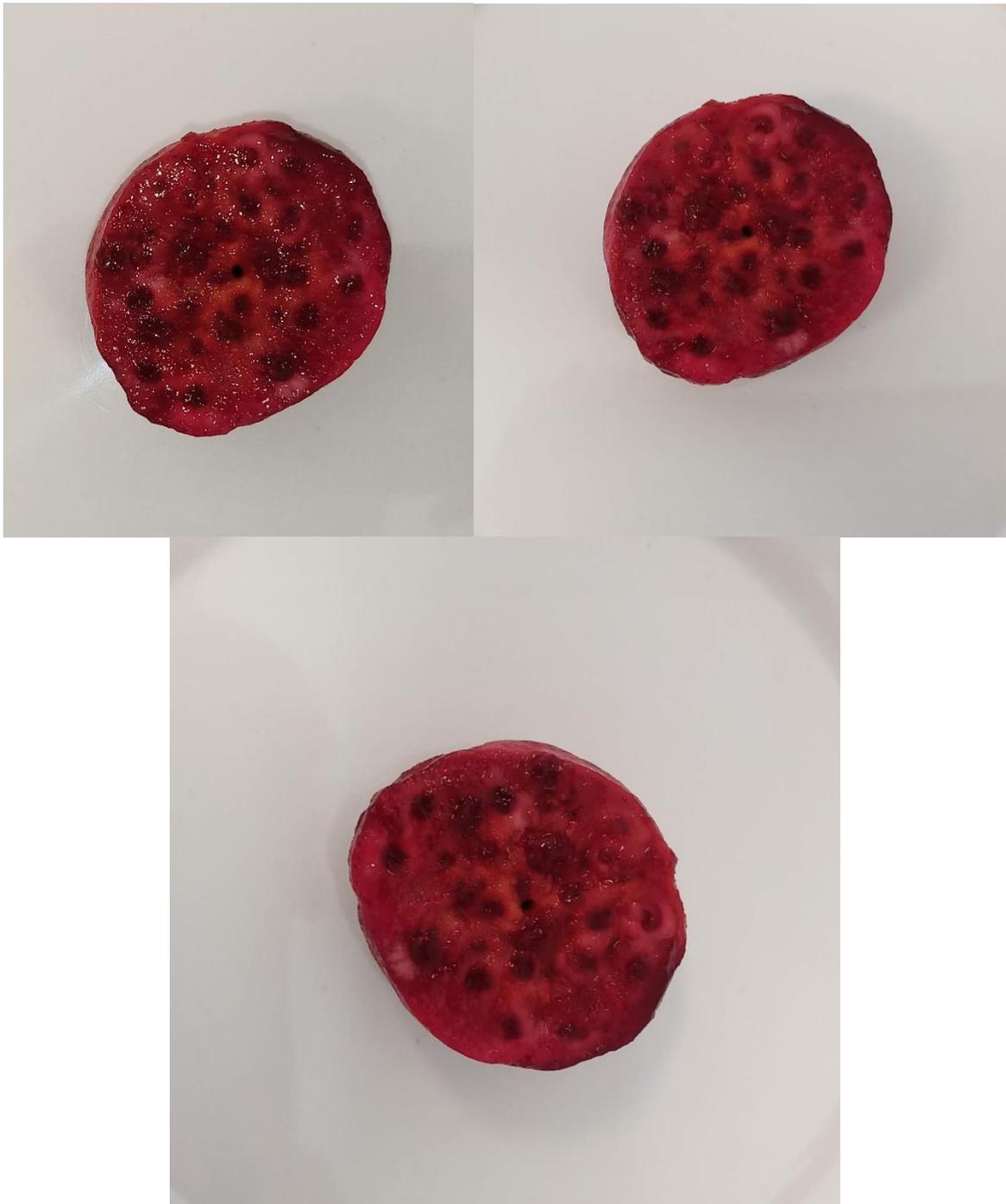
Autor: Alejandro Oros.

Anexo 17. Fotografías de tuna Amarillo Plátano (*Opuntia megacantha*) analizada del Valle de Teotihuacán en el Laboratorio de Investigación de Evaluación Sensorial.



Autor: Alejandro Oros.

Anexo 18. Fotografías de tuna Roja Pelona (*Opuntia ficus-indica* L.) analizada del Altiplano Mexicano en el Laboratorio de Investigación de Evaluación Sensorial.



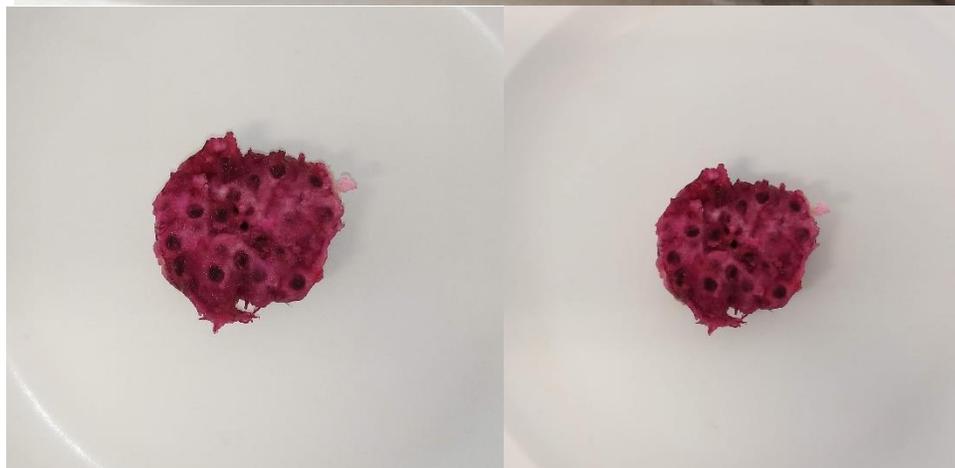
Autor: Alejandro Oros.

Anexo 19. Fotografías de tuna “Naranjona” (*Opuntia megacantha*) analizada del Altiplano Mexicano en el Laboratorio de Investigación de Evaluación Sensorial.



Autor: Alejandro Oros.

Anexo 20. Fotografías de tuna Charola (*Opuntia streptacantha*) analizada del Altiplano Mexicano en el Laboratorio de Investigación de Evaluación Sensorial.



Autor: Alejandro Oros.