



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH

Escola d'Enginyeria Agroalimentària  
i de Biosistemes de Barcelona

# **Comparativa y selección de métodos de extracción de mucílago de *Opuntia ficus-indica* para su uso como recubrimiento comestible**

Trabajo final de grado  
Ingeniería Alimentaria

Autor: Andrea Osorio Barreto

Tutor: Isabel Achaerandio

Fecha: 1/07/2022

## Resum

El mucílago extret de l'*Opuntia ficus-indica* és un component que pot arribar a ser molt versàtil per a la seva utilització a la indústria alimentària. En aquest treball es va realitzar l'estudi de l'obtenció del mucílago a través de 3 mètodes, seleccionant-ne un per a la seva aplicació i introduint la utilització de la sonda MS73 d'ultrasons (US) Bandelin sonopuls GM70 (potència: 70 W i freqüència: 20 kHz) amb un cicle de 50 segons i una potència de 50 % per obtenir-lo i observar si hi havia una millora en el rendiment d'extracció i composició (pH, i SST, °Brix). Els resultats obtinguts introduint la tècnica d'US durant el macerat de la mostra van ser de 4,28 % per al rendiment, 4,36 per a pH i 3,57 °Brix per SST, en l'experiment realitzat a la fase 3.2; mentre que per a l'experiment de la mateixa fase, sense aplicar US, es va obtenir 2,90 % per a rendiment, 3,13 °Brix i mateixos valors de pH. Es va observar que el tractament ultrasònic beneficiava el color del mucílago obtingut, proporcionant-li una tonalitat més blanquinosa.

**Paraules clau:** mucílago, *Opuntia*, ultrasons, rendiment.

## Resumen

El mucílago extraído de la *Opuntia ficus-indica*, es un componente que puede llegar a ser muy versátil para su utilización en la industria alimentaria. En este trabajo se realizó el estudio de la obtención del mucílago a través de 3 métodos, seleccionando uno de ellos para su aplicación e introduciendo la utilización de la sonda MS73 de ultrasonidos (US) Bandelin sonopulso GM70 (potencia: 70 W y frecuencia: 20 kHz) con un ciclo de 50 segundos y una potencia de 50 % para obtenerlo y observar si había una mejora en el rendimiento de extracción y composición (pH y SST, °Brix). Los resultados obtenidos introduciendo la técnica de US durante el macerado de la muestra, fueron de 4,28 % para el rendimiento, 4,36 para pH y 3,57 °Brix para SST, en el experimento realizado en la fase 3.2; mientras que, para el experimento de la misma fase, sin aplicar US, se obtuvo 2,90 % para rendimiento, 3,13 °Brix y mismos valores de pH. Se observó que el tratamiento ultrasónico beneficiaba al color del mucílago obtenido, proporcionándole una tonalidad más blanquizca.

**Palabras clave:** mucílago, *Opuntia*, ultrasonido, rendimiento.

## Abstract

The mucilage extracted from *Opuntia ficus-indica* is a component that can be very versatile for use in the food industry. In this work, a study was carried out to obtain the mucilage through 3 methods, selecting one of them for its application and introducing the use of the Bandelin sonopulse GM70 MS73 ultrasound probe (US) (power: 70 W and frequency: 20 kHz) with a cycle of 50 seconds and a power of 50 % to obtain it and observe if there was an improvement in the extraction yield and composition (pH and TSS, °Brix). The results obtained by introducing the ultrasound technique during the maceration of the sample were 4,28 % for yield, 4,36 for pH and 3,57 °Brix for TSS, in the experiment carried out in phase 3.2; while for the experiment in the same phase, without applying ultrasound, 2,90 % was obtained for yield, 3,13 °Brix and the same pH values. It was observed that the ultrasonic treatment benefited the colour of the mucilage obtained, giving it a whiter shade.

**Keywords:** mucilage, *Opuntia*, ultrasound, yield.

## ÍNDICE

<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	<b>6</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b>	<b>7</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b>	<b>8</b>
<b>PREFACIO</b>	<b>9</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>10</b>
1.1. Características de <i>Opuntia ficus-indica</i>	12
1.2. Propiedades del mucílago	13
1.3. Métodos utilizados para la extracción del mucílago	17
1.4. Utilización del mucílago de <i>Opuntia ficus-indica</i> como recubrimiento	21
1.5. Técnica de ultrasonido (US)	25
<b>2. OBJETIVOS</b>	<b>30</b>
<b>3. MATERIALES Y MÉTODOS</b>	<b>31</b>
3.1. Materia Vegetal	32
3.2. Fase 1: Revisión y selección de métodos para la extracción	32
3.2.1. Revisión de métodos	32
3.2.2. Selección de métodos de extracción y pruebas preliminares	36
3.3. Fase 2: Aplicación de modificaciones a los métodos y comparativa	40
3.4. Fase 3: Efecto de la aplicación de US en la obtención de mucílago	40
3.5. Análisis estadístico	44
<b>4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>45</b>
4.1. Fase 1: Resultados preliminares de métodos seleccionados para la extracción	46
4.1.1. pH y SST (°Brix)	48
4.1.2. Rendimiento	49
4.2. Fase 2: Resultados de aplicación de modificaciones a los métodos y comparativa	51
4.2.1. pH y SST (°Brix)	51
4.2.2. Rendimiento	53
4.3. Fase 3: Resultados del efecto de la aplicación de US en los métodos de extracción	56
4.3.1. Fase 3.1: Resultados preliminares del efecto de aplicación de US	56
4.3.2. Fase 3.2: Resultados de la comparativa entre métodos de extracción de mucílago aplicando US y sin US	60

Comparativa y selección de métodos de extracción de mucílago de <i>Opuntia ficus-indica</i> para su uso como recubrimiento comestible	5
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>67</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>68</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>76</b>

## Índice de figuras

FIGURA 1. DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DE <i>OPUNTIA FICUS-INDICA</i> EN ESPAÑA. FUENTE: SANZ ELORZA M. ET AL., 2004, ATLAS DE LAS PLANTAS ALÓCTONAS INVASORAS EN ESPAÑA. DIRECCIÓN GENERAL PARA LA BIODIVERSIDAD. MADRID, 384 PP	11
FIGURA 2. FASES A COMPLETAR DURANTE EL DESARROLLO DEL TRABAJO	31
FIGURA 3. <i>OPUNTIA FICUS-INDICA</i> (A). MATERIAL VEGETAL DESPUÉS DE DESINFECCIÓN, PELADO Y DESESPINADO (B).	32
FIGURA 4. DIAGRAMA EXPERIMENTAL DE LOS MÉTODOS DE EXTRACCIÓN DE LA FASE 1	38
FIGURA 5. MACERADO A 40°C (A). UTILIZACIÓN DE DEDO FRIO PARA ENFRIAMIENTO (B)	39
FIGURA 6. MATRAZ KITASATO (A). EMBUDO Y FILTRO DE PAPEL (B). UTILIZACIÓN DE MATRAZ KITASATO EMBUDO DE VACÍO PARA FACILITAR LA EXTRACCIÓN DEL MUCÍLAGO	39
FIGURA 7. APLICACIÓN DE US DURANTE LA MACERACIÓN	41
FIGURA 8. DIAGRAMA DE MÉTODO N° 1 (ALLEGRA ET AL., 2016), SIN APLICACIÓN DE US Y MÉTODO N° 1 MODIFICADO APLICANDO US. FASE 3: COMPARATIVA (3.2)	43
FIGURA 9. PH (B) Y SÓLIDOS SOLUBLES TOTALES (SST, °Brix) (B) DE EXPERIMENTOS PRELIMINARES PARA MÉTODO N° 1 (ALLEGRA ET AL., 2016), MÉTODO N° 3 (ADETUNJI ET AL., 2012). Y MÉTODO N° 4. (ZEGBE ET AL., 2015)	48
FIGURA 10. RENDIMIENTO MEDIO DE MUCÍLAGO (A) DE MÉTODO N° 1 (ALLEGRA ET AL., 2016) Y MÉTODO N° 4 (ZEGBE ET AL., 2015), Y VOLÚMENES DE ETANOL (B) UTILIZADOS	50
FIGURA 11. COMPARATIVA DE PH (A) Y SST (°Brix) (B) CON PROPORCIONES <i>OPUNTIA</i> /AGUA(W/V) 1:1,5 DEL MÉTODO N° 1 (ALLEGRA ET AL., 2016) Y CON PROPORCIONES 1:1 DE MÉTODO MODIFICADO	52
FIGURA 12. COMPARATIVA DE RENDIMIENTOS CON PROPORCIONES <i>OPUNTIA</i> /AGUA(W/V) 1:1,5 Y 1:1 DEL MÉTODO N° 1 (ALLEGRA ET AL., 2016)	53
FIGURA 13. COMPARATIVA DE PH (A) Y SST (°Brix) (B) CON PROPORCIONES <i>OPUNTIA</i> /AGUA (W/V) 1:1 PARA MÉTODO 1 MODIFICADO, CON US Y SIN US	58
FIGURA 14. RENDIMIENTOS OBTENIDOS (A) PARA LAS RÉPLICAS DEL EXPERIMENTO CON PROPORCIONES <i>OPUNTIA</i> /AGUA (W/V) 1:1 PARA MÉTODO N° 1 MODIFICADO, CON US Y SIN US, Y VOLÚMENES DE ETANOL UTILIZADOS (B)	59
FIGURA 15. COMPARATIVA DE VALORES MEDIOS DE PH (A) Y SST (°Brix) (B) DE MÉTODO N° 1 MODIFICADO CON PROPORCIÓN <i>OPUNTIA</i> /AGUA (W/V) 1:1 CON US Y MÉTODO N° 1 (ALLEGRA ET AL., 2016) CON PROPORCIÓN 1:1,5 SIN US	61
FIGURA 16. RENDIMIENTOS OBTENIDOS (A) PARA LAS RÉPLICAS DEL MÉTODO N° 1 (ALLEGRA ET AL., 2016) CON PROPORCIÓN 1:1,5 SIN US Y MÉTODO N° 1 MODIFICADO CON PROPORCIÓN <i>OPUNTIA</i> /AGUA(W/V) 1:1 CON US; Y VOLÚMENES DE ETANOL UTILIZADOS (B)	63
FIGURA 17. COMPARATIVA ENTRE TIEMPO DE EXTRACCIÓN, VOLUMEN DE ETANOL UTILIZADO Y RENDIMIENTO OBTENIDO PARA EL EXPERIMENTO SIN US (A) Y CON US (B)	64

## Índice de tablas

TABLA 1. MÉTODOS PARA EL ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES DEL MUCÍLAGO	14
TABLA 2. COMPARATIVA DE MÉTODOS UTILIZADOS PARA LA EXTRACCIÓN DEL MUCÍLAGO DE <i>OPUNTIA. FICUS-INDICA</i>	18
TABLA 3. APLICACIONES DEL MUCÍLAGO DE <i>OPUNTIA FICUS-INDICA</i>	22
TABLA 4. SUSTANCIAS QUE SE PUEDEN INCORPORAR AL MUCÍLAGO DE <i>OPUNTIA</i>	23
TABLA 5. APLICACIÓN DE RECUBRIMIENTOS COMESTIBLES A BASE DE MUCÍLAGO DE <i>OPUNTIA</i> SOBRE DIFERENTES FRUTAS	24
TABLA 6. APLICACIONES DE ULTRASONIDOS EN EL PROCESAMIENTO DE ALIMENTOS.	28
TABLA 7. SELECCIÓN DE MÉTODOS PARA LA EXTRACCIÓN DEL MUCÍLAGO	33
TABLA 8. NOMENCLATURA ESTABLECIDA DURANTE LA FASE 1 DEL EXPERIMENTO	37
TABLA 9. NOMENCLATURA ESTABLECIDA DURANTE LA FASE 2 DEL EXPERIMENTO	40
TABLA 10. NOMENCLATURA ESTABLECIDA DURANTE LA FASE 3 DEL EXPERIMENTO	42
TABLA 11. DIFERENCIAS CUALITATIVAS OBTENIDAS DURANTE LA APLICACIÓN DEL MÉTODO N° 3, N° 1, Y N° 4 . FASE 1	46
TABLA 12. RESULTADOS CUALITATIVOS OBTENIDOS DURANTE LA FASE 2 PARA EL MÉTODO N° 1 MODIFICADO	55
TABLA 13. COMPARATIVA DE RESULTADOS CON US Y SIN US CON PROPORCION DE AGUA PARA MACERADO DE 1:1	57
TABLA 14. COMPARATIVA DE RESULTADOS SIN US Y PROPORCIÓN DE AGUA 1:1,5; Y CON US Y PROPORCIÓN DE AGUA 1:1	60
TABLA 15. RESULTADOS CUALITATIVOS OBTENIDOS DURANTE LA FASE 3	66



## Agradecimientos

Quiero agradecer a mis familiares, y sobre todo a mi pareja, Christian García García, por el apoyo y el impulso brindado durante el desarrollo de este trabajo.

Además, también agradecer a mi tutora, Isabel Achaerandio, por recomendarme el tema para la realización de este trabajo final de grado.

## Prefacio

Este trabajo se desarrolló durante los meses de octubre a diciembre en los laboratorios de la EEABB, aplicando diferentes métodos y realizando las pautas establecidas para cada experimento. Este trabajo se enmarca en el proyecto de obtención de nuevos recubrimientos a partir de material vegetal de poco valor añadido. Todos los datos obtenidos se tuvieron en cuenta para la finalización de este trabajo final de grado.

## 1. Introducción

La *Opuntia*, nopal o más comúnmente conocido como chumbera, es una planta espinosa perteneciente a la familia de las cactáceas, cuyo crecimiento se da típicamente en zonas áridas. El nopal es una especie arbustiva cuya altura puede llegar a ser de 6 metros aproximadamente, formada por tallos modificados llamados cladodios o filocladios. En adelante filocladios. Estos filocladios contienen espinas, de 2-3 cm de longitud, aplanadas y de color blanco en las zonas silvestres.

El género *Opuntia* es estrictamente americano, probablemente sea una especie originaria de México, en donde los nativos se dedicaban al cultivo para su consumo, tanto de los filocladios como de los frutos. México es uno de los centros de origen del nopal (*Opuntia spp.*). El consumo de sus tallos modificados (nopalitos), frutos y flores en México es ancestral (Maki-Díaz et al., 2014). Las épocas de incursión europea permitieron su introducción en España, en el norte de África y la zona del mediterráneo. No obstante, en esta última la invasión natural es limitada por la humedad y temperaturas invernales frías, comparadas con las temperaturas secas y calientes del verano de estas zonas. Las plántulas suelen desarrollarse muy rápidamente durante los meses estivales, de este modo se asegura su permanencia en zonas invadidas.

Es una planta cuya tolerancia al viento y altas temperaturas, permitieron su introducción en zonas semiáridas y áridas como Australia y zonas costeras, aunque su desarrollo se presenta deficiente en suelos muy húmedos. Las plantas de nopal por su adaptación al déficit de humedad y climas semidesértico y desértico son un recurso con gran potencial para el desarrollo de plantaciones (Reyes-Agüero et al., 2005). En España *Opuntia ficus-indica*, está considerada como una especie alóctona invasora, ubicada mayoritariamente en la costa mediterránea e islas canarias en ambientes rurales, zonas deforestadas o abiertas. La planta resiste bastante bien la sequía y los vientos marítimos lo que ha favorecido su desarrollo en estas zonas. La razón inicial de su

introducción en la península ibérica fue la producción de "grana cochinilla" o *Dactylopius opuntiae* para la obtención de colorante rojo.

A día de hoy se conservan algunos cultivos de *Opuntia* en algunas de las islas con dichos fines, por lo que ha sido necesario, buscar otras fuentes de aprovechamiento. Según la FAO dichas plantas pueden contribuir a la sostenibilidad alimentaria en muchas regiones.

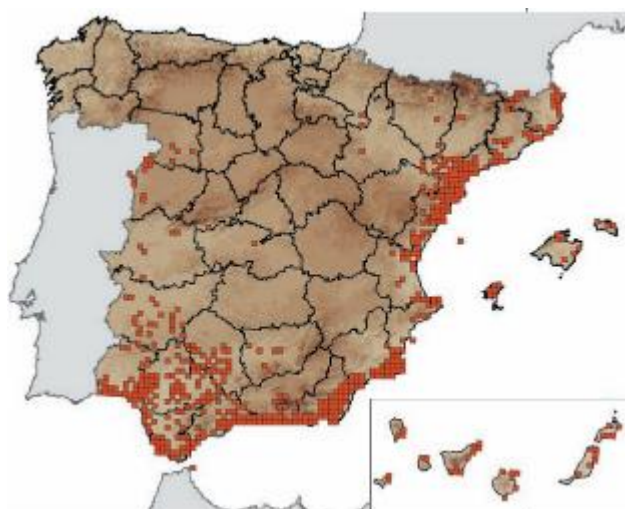


Figura 1. Distribución geográfica de *Opuntia ficus-indica* en España. Fuente: Sanz Elorza M. et al., 2004, Atlas de las Plantas Alóctonas Invasoras en España. Dirección General para la Biodiversidad. Madrid, 384 pp

Actualmente la planta se cultiva con propósitos comerciales en México, algunas zonas de Estados Unidos, zona mediterránea, oriente medio, norte de África y Sudamérica. Los nopales son ahora parte del entorno natural y de los sistemas agrícolas y se considera que *Opuntia ficus-indica* es la cactácea de mayor valor económico en el mundo (Kiesling, 1999).

## 1.1. Características de *Opuntia ficus-indica*

Los filocladios de *opuntia* tienen forma de raqueta y un grosor de 2 a 3 cm, que depende tanto de la edad de la planta como de los nutrientes que esta absorbe durante su crecimiento. La planta presenta dos capas, una que contiene las células verdes o clorénquima y la capa interna de células blancas que constituyen el parénquima. Los filocladios de la opuntia o nopal excretan una sustancia llamada mucílago. Entre los tejidos del clorénquima y parénquima se localizan las células que almacenan el mucílago. Estas células son más abundantes en el parénquima. Su composición se basa principalmente en polisacáridos, macromoléculas ramificadas que forman redes moleculares capaces de retener grandes cantidades de agua, convirtiéndolas en una fuente potencial de hidrocoloides naturales que proporcionan un importante efecto espesante (Sepúlveda et al., 2007). Los mucílagos son complejas sustancias poliméricas, compuestas por carbohidratos naturales, considerados de gran interés en la industria alimentaria, farmacéutica y cosmética, por sus características funcionales, nutricionales y beneficiosas para la salud (Otálora et al., 2021).

Los estudios de sus tejidos han demostrado que el mucílago está presente en el aparato de Golgi y la síntesis del mucílago probablemente tiene lugar en este y en las vesículas que derivan de él (Trachtenberg et al., 1981). En particular el mucílago de *Opuntia ficus-indica* se compone de arabinosa, galactosa, ramnosa, xilosa y ácido galacturónico. Hay otros minerales presentes como el calcio y el potasio, los carbohidratos y la fibra dietética (Sáenz et al., 1999). El mucílago del nopal se considera importante para la industria alimentaria debido a propiedades como la viscosidad, elasticidad, textura, retención de agua, además de ser un buen gelificante, espesante y emulsificante (Rodríguez-González et al., 2014). Gracias a su capacidad de formar redes moleculares, se puede hacer uso del mucílago de la *Opuntia ficus-indica* como recubrimiento comestible.

## 1.2. Propiedades del mucílago

Los filocladios del cactus de *Opuntia ficus-indica* presentan una fuente de compuestos fenólicos, flavonoides, minerales y nutrientes. Las características reológicas del mucílago lo hacen interesante para la producción de recubrimientos comestibles naturales de alto valor nutracéutico, útiles para la conservación de frutas y alimentos. Los polifenoles son una familia de moléculas orgánicas que se encuentran ampliamente distribuidas en el reino vegetal. Como su nombre indica, sus estructuras químicas se caracterizan por la presencia de diferentes grupos fenólicos, que pueden estar asociados a grupos químicos más o menos complejos, generalmente de alto peso molecular. Estos compuestos suelen ser subproductos del metabolismo vegetal que se sintetizan en respuesta a estímulos ambientales o estrés (Messina et al., 2021).

La composición química de los filocladios de *Opuntia ficus-indica* se ha analizado parcialmente en algunos estudios (Contreras-Padilla et al., 2016; Sáenz et al., 2004). Según varios autores las propiedades reológicas, principalmente la viscosidad intrínseca del mucílago, depende de su composición química, pH, grado de esterificación y presencia de iones calcio (Sáenz et al., 2004; Sepúlveda et al., 2007).

A continuación, se presenta un resumen de los métodos utilizados para el análisis de propiedades de *Opuntia ficus-indica* (Tabla 1).

Tabla 1. Métodos para el análisis de las propiedades del mucílago

Propiedad	Método	Ensayo	Reactivos	Objetivo	Lectura de la muestra	Expresión de resultados	Valores obtenidos
Capacidad antioxidante	Contenido total de polifenoles (Messina et al., 2021).	Versión modificada del ensayo de Folin-Ciocalteu.	Reactivo fenol de Folin-Ciocalteu. Ácido gálico para calibración (5 - 500 mg / mL).	Análisis de compuestos Fenólicos totales.	Mediante absorbancia, 765 nm.	mg equivalentes de ácido gálico (GAE) / g peso seco (DW) de mucílago.	1,71 – 4,09 mg GAE / g DW.
	Método reportado por Guevara-Figueroa et al., 2010						5,25 – 11,7 mg de GAE / g de muestra seca.
	Actividad captadora de radicales DPPHH (1,1-difenil-2-picrilhidrazilo) (Messina et al., 2021)	Técnica de la 2.2-Difenil-1-picrilhidrazilo (DPPH) para determinar la capacidad antioxidante.	Diversas concentraciones (1 - 10 mg / mL) de extractos etanólicos de cantidad específica (400 µL).  Patrones de catequina y epicatequina.	Evaluación de la capacidad antioxidante de alimentos y compuestos sintéticos.	Mediante absorbancia, empleando ácido gálico como referencia, blanco, 517 nm.	Inhibición de radicales libres en porcentaje ( <b>I %</b> ).  $I \% = 1 - \left( \frac{A \text{ muestra}}{A \text{ blanco}} \right) \times 100 \%$  Cálculo de la concentración cuando el poder antioxidante se reduce al 50 %, donde <b>A muestra</b> : absorbancia de la muestra; <b>A blanco</b> : absorbancia del blanco.	7,04 – 25,78 %
Método de Oyaizu (Messina et al., 2021).	Poder reductor.	Soluciones de muestra, tampón fosfato de 0,2 M, pH 6,6, ferricianuro de potasio [K <sub>3</sub> Fe(CN) <sub>6</sub> ] al 1 %, (1:1:1).  Ácido tricloroacético, agua destilada y FeCl <sub>3</sub> (0,1 %), (1:1:2).	Evaluación del poder reductor frente al hierro (III).	Mediante absorbancia a 700 nm. Ácido gálico como patrón.	Regresión lineal. El valor de CE 50 (mg / mL) es la concentración efectiva del extracto a la que la absorbancia fue de 0,5.	48,18 – 153,86 mg / mL.	

Tabla 1. Métodos para el análisis de las propiedades del mucílago (Cont.)

Propiedad	Método	Ensayo	Reactivos	Objetivo	Lectura de la muestra	Expresión de resultados	Valores obtenidos
	Método descrito por Delgado-Vargas y Paredes-López (Betancourt-Domínguez et al., 2006).	Determinación carotenos totales, $\beta$ -caroteno y luteína.	Etanol, alcohol isopropílico, hexano.	Comparación del tiempo de retención entre una mezcla de isómeros de carotenos y trans-luteína.	Mediante HPLC a 30 °C. Detección realizada a 450 nm.	Carotenos totales: mg de pigmento / g de peso fresco  $\beta$ -caroteno y luteína: $\mu\text{g}$ / g de peso fresco.	0,33 – 0,38 mg de carotenos totales / g de peso fresco.  14,5 – 39,5 $\mu\text{g}$ de $\beta$ -caroteno / g de peso fresco.  6,8 – 27 $\mu\text{g}$ de luteína / g de peso fresco.
Sólidos solubles totales	Sólidos solubles totales (SST, °Brix) (Carpintero-Tepole et al., 2021).	°Brix mediante refractómetro.	-	Evaluar el contenido de sólidos solubles del extracto acuoso de mucílago.	Mediante refractómetro a $25 \pm 1^\circ\text{C}$	°Brix (g de sacarosa / 100 g de solución). (w/w).	$3,83 \pm 0,29$ °Brix
Contenido mineral	Espectrometría de masas de plasma acoplado inductivamente, ICP - MS (Astello-García et al., 2015).	Espectrometría de masa.	$\text{HNO}_3:\text{HCl}$ (1:3).	Determinación del contenido mineral por ICP-MS.	Mediante espectrometría de masas ICP Varian 820-MS.	mg de mineral / 100 g de muestra.	K:2403; Ca:627; Na:63; P:0,09; Fe: 8,6; Mn: 13,8 mg / 100 g de muestra.
Azúcares totales	Método del reactivo antrona- $\text{H}_2\text{SO}_4$ (Astello-García et al., 2015).	Reactivo antrona.	Dextrosa, antrona- $\text{H}_2\text{SO}_4$ .	Determinación de azúcares solubles totales.	Colorimetría. Utilización de dextrosa como compuesto de referencia.	mg de dextrosa / 100 g de muestra.	38,0 mg de dextrosa / 100 g de muestra.



Tabla 1. Métodos para el análisis de las propiedades del mucílago (Cont.)

Propiedad	Método	Ensayo	Reactivos	Objetivo	Lectura de la muestra	Expresión de resultados	Valores obtenidos
Acidez titulable	De acuerdo al método AOAC (2007) (Astello-García et al., 2015).	Método AOAC, utilizando NaOH a pH 8,2.	NaOH 0,1 N	Conocer el porcentaje de ácido cítrico.	Valoración acido-base (volumetría).	Resultados expresados como:  $\% \text{ de ácido cítrico} = \frac{N \cdot V \cdot \text{mEq ácido cítrico}}{W}$ N: concentración de NaOH; V: volumen de NaOH utilizado para la titulación; W: peso de la muestra; mEq: miliequivalentes de ácido cítrico 0,064.	3,0 %
pH	De acuerdo al método AOAC (2007). (Astello-García et al., 2015).	Medición de pH por el método AOAC 2007.	Agua ultrapura.	Conocer el pH de la muestra.	Mediante pHmetro.	Grado de acidez o alcalinidad.	4,4 – 4,5

### 1.3. Métodos utilizados para la extracción del mucílago

Los métodos utilizados para la extracción del mucílago juegan un papel importante tanto en la aplicación de este, como en la composición del propio mucílago, además, de en su vida útil. Existen diferentes métodos utilizados, para la extracción del mucílago de los filocladios de *Opuntia*, siendo más común el uso de la maceración después de mezclarlo con agua destilada a temperatura ambiente, para después calentarlo. Estos métodos pueden ser efectivos, sin embargo, son largos y pueden resultar costosos (Tabla 2).

A continuación, se citan algunos métodos utilizados para la extracción del mucílago, enumerando las ventajas y desventajas que supone realizarlos, así como las técnicas a seguir.

Comparativa y selección de métodos de extracción de mucílago de *Opuntia ficus-indica* para su uso como recubrimiento comestible

Tabla 2. Comparativa de métodos utilizados para la extracción del mucílago de *Opuntia. ficus-indica*

Método	Materia prima vegetal	Objetivo	Pretratamientos	Técnicas a seguir durante el método de extracción	Ventajas	Desventajas
<b>Ultrafiltración por extracción mecánica: Ultrafiltración de flujo cruzado UF</b>  (V. Carpintero-Tapole et al., 2021).	Filocladios enteros.	Obtener extracto concentrado, mucílago seco.	No se realiza un macerado previo.  Lavado con agua dulce y almacenamiento a 4 °C.  No cortar los filocladios.	Molienda (Filocladios enteros).	Extensión de la vida útil del mucílago de hasta 60 días, almacenándolo a 4 °C.  El tiempo de vida útil puede ser importante de cara a la utilización del extracto para realizar las pruebas en la aplicación de las frutas.	Se debe rehidratar.  Obtención de extracto seco.  Método complejo, debido a la utilización del secado.  Bajo rendimiento.
				Centrifugación.		
				Decantación.		
				Filtración al vacío.		
				Evaporación a 60 °C a 75 mbar.		
				Secado (secador de aire seco): flujo de aire seco 6 L/h, con temperatura de entrada 160 °C, temperatura de salida 90 °C.		
<b>Método de filtrado simple SFM.</b>  <b>Método de concentración FCM y clarificación-concentración FCCM</b>  (Reyes-Ocampo et al., 2018)	Filocladios enteros de 15 días de edad.	Obtención del extracto de mucílago seco.	No se realiza macerado previo. Molienda  Molienda (filocladios enteros).	Filtrado (con filtro de papel): 3 veces, a una presión de 670 mbar.	Rendimiento para SFM 1,17 % de peso seco.  Método sencillo en principio para obtener el mucílago a partir del jugo del filocladio.  Se obtuvo mayor viscosidad con FCM y FCCM, 0,318 Pa·s, que, con el método simple, 0,101 Pa·s.	Se obtiene un extracto seco.  Los balances de masa mostraron que los métodos de filtrado-clarificación-concentración FCCM y filtrado concentración FCM se obtuvo rendimientos más bajos 0,4% y 0,72 % respectivamente.
				Determinación de la masa seca: con material vegetal crudo, usando 10 - 25 g de material crudo, pesado y secado 12 h a 60 °C.		
				Secado por aspersion: atomización a 20.000 rpm, temperatura de entrada 135 °C.		

Tabla 2. Comparativa de métodos utilizados para la extracción del mucílago de *Opuntia ficus-indica* (Cont.)

Método	Materia prima vegetal	Objetivo	Pretratamientos	Técnicas a seguir durante el método de extracción	Ventajas	Desventajas
				Filtración (3 veces con filtro de papel).		
				Evaporar hasta una sexta parte de su volumen (evaporador rotativo de vacío). Temperatura del vapor de entrada 110 °C y temperatura del líquido de salida 80 °C <sup>a</sup> .		
<b>(MAE (extracción asistida por microondas)</b>  <b>(Felkai-Haddache et al., 2016)</b>	Filocladios.	Obtener extracto de mucílago.  Investigar el efecto de la relación cladodio-agua (1:3 y 1:4) en el rendimiento del extracto.  Investigar efecto de la potencia y tiempo de irradiación en el rendimiento del mucílago.	Enjuagar con agua destilada (0,5 µS / cm).  Desinfectar con etanol al 70%.  Retirar espinas y epidermis.  Almacenamiento a 4 °C.	Molienda  MAE: 5 minutos a 700 W y 3 minutos a 900 W.  Centrifugar, 15 minutos a 4 °C.  Precipitar con etanol 95 % (v/v), 8 h a 4 °C.  Lavado del precipitado con etanol 75 % (v/v).  Liofilización 12 h a -55 °C.	La extracción asistida por microondas (MAE) es una alternativa para la extracción de sustancia de materiales, que tiene características de economización del tiempo de extracción, cantidad de solvente y consumo de energía (Zheng et al., 2011)  La recuperación del mucílago extraído aumenta aumentando la potencia de microondas.  Un aumento en la potencia de microondas mejorará la solubilidad de la muestra para una mayor eficiencia de extracción (Thirugnanasambandham et al., 2015).	Trabajos anteriores han demostrado que la exposición excesiva tiempo - potencia bajo los campos de microondas, conduce a degradar las moléculas de polisacárido (Zheng et al., 2011).  Modificación del microondas para extraer los vapores de condensación.  Método muy complejo.

Tabla 2. Comparativa de métodos utilizados para la extracción del mucílago de *Opuntia. ficus-indica* (Cont.)

Método	Materia prima vegetal	Objetivo	Pretratamientos	Técnicas a seguir durante el método de extracción	Ventajas	Desventajas
(Liguori et al., 2021)	Filocladios enteros de 1 año de edad.	Obtención de extracto acuoso de mucílago.	Lavado con agua clorada al 1%.  Eliminar espinas y clorénquima con un pelador.  Cortar en cuadros.	Cocción en microondas, 3 - 5 minutos a 900 W.	Método sencillo.	Se obtiene una solución de mucílago.
				Homogenizar.		
				Centrifugar a 8117 x g, 15 minutos a 4 °C.		
				Decantar.		
(Bayar et al., 2017a)	Polvo de filocladios.	Obtener extracto de mucílago.	-	Extracción sólido - líquido con agua destilada en proporción 1:15 (w/v), 90 minutos a temperatura ambiente.	Método sencillo, fácil extracción, poco tiempo de extracción.	Este método es complementario de otros en los que se obtiene un extracto seco.  Eliminación del alcohol.
				Centrifugar 20 minutos a 4000 rpm.		
				Extracción con alcohol isopropílico.		

En alguno de los métodos anteriormente citados se hace uso de disolventes para la extracción del mucílago. Muchos autores han informado que el rendimiento depende del solvente y la proporción de este (Goycoolea et al., 2003.; Sáenz et al., 2004). Cardenas et al., 1998, utilizaron etanol como agente precipitante, obteniendo un rendimiento de 0,07 % de mucílago seco mientras que, Sepuívada et al., 2007, obtuvieron 1,48 %, utilizando isopropanol en una relación agua / alcohol de 1:3. Otros disolventes, como 2 - propanol (Cortázar & Nobel, 1992), acetona (Medina-Torres et al., 2000) y éter de petróleo (Majdoub et al., 2001) se han utilizado, aunque con eficiencias bajas.

#### **1.4. Utilización del mucílago de *Opuntia ficus-indica* como recubrimiento**

Los polímeros que componen el mucílago son polímeros de alto peso molecular, que oscila entre  $15,3$  y  $15,7 \times 10^6 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ . Este carbohidrato se considera una fuente potencial de hidrocoloides industriales (Felkai-Haddache et al., 2016), encontrándose múltiples usos para este componente, entre los que se encuentran, espesante alimentario, emulsionante alimentario, purificador de agua, adhesivo para morteros de cal, plastificante en morteros de cal, producto alimentario y recubrimiento comestible (Tabla 3).

Tabla 3. Aplicaciones del mucílago de *Opuntia ficus-indica*

Aplicaciones del mucílago	Ejemplo
Estabilizante (Villanueva Puma, 2020).	Nectar agua y manto ( <i>Physalis peruviana</i> )
Coagulante (Olivero Verbel et al., 2013)	Remover turbidez del agua
Coagulante, floculante(Puma Condori, 2020)	Adyuvante de FeCl <sub>3</sub>
Clarificantes (retirar la fibra) (Loyo Godoy, 2018).	En zumo de caña
Coagulante clarificante (Contreras Lozano et al., 2015)	Clarificante en agua
Espesante alimentario (Reyes-Buendía et al., 2020)	Sopa de elote ( <i>Zea-mays</i> )

Un recubrimiento comestible (RC) se puede definir como una matriz transparente continua, comestible y delgada, que se estructura alrededor de un alimento generalmente mediante la inmersión del mismo en una solución formadora del recubrimiento con el fin de preservar su calidad y servir de empaque. (Fernández Valdés et al., 2015). Por otra parte, una película comestible (PC) es una matriz preformada obtenida por moldeo, cuyo espesor es siempre mayor al de los RC (Del-Valle et al., 2005).

Estas soluciones formadoras de películas o recubrimientos pueden estar constituidas por matrices de naturaleza proteica, lipídica, polisacáridos o por una combinación de estos, actuando sobre el alimento como barrera frente al intercambio de gases y vapor de agua durante su conservación y ayudando a alargar el tiempo de vida útil de los productos, ya sean frutas u hortalizas, además de favorecer la minimización de las pérdidas postcosecha.

Dichos recubrimientos al controlar transferencia de humedad, gases, y compuestos volátiles, han demostrado la capacidad de mejorar la integridad y la calidad de los alimentos, además de prolongar su vida de almacenamiento. Sin embargo, al recubrir un fruto u hortaliza para retardar la

pérdida de humedad, es necesario que exista una cierta permeabilidad al oxígeno y dióxido de carbono para evitar una respiración anaeróbica que podría inducir desórdenes fisiológicos y una pérdida rápida de la calidad y vida de anaquel en los mismos. (Fernández Valdés et al., 2015).

Al mucílago de *Opuntia* se le pueden incorporar diferentes ingredientes (Tabla 4) que pueden contribuir con la conservación, palatabilidad y calidad del alimento, como antioxidantes, antimicrobianos, nutrientes, sabores y colorantes. Una vez disecados los hidrocoloides, es posible añadir otras sustancias, como antimicrobianos, antioxidantes, aromatizantes y colorantes, a la solución formadora de la película para conferirle la propiedad funcional deseada. (Campos et al., 2011).

Tabla 4. Sustancias que se pueden incorporar al mucílago de *Opuntia*

Ingrediente incorporado al mucílago	Tipo de ingrediente	Referencia
Glicerol	Alcohol	(Allegra et al., 2016)
		(Adetunji, et al., 2012)
		(Zegbe et al., 2015)
Polietilenglicol (PEG)	Polieter	(Zegbe et al., 2015)
Ácido ascórbico	Ácido	(Liguori et al., 2021)
Gelatina	Proteína	(Lira-Vargas et al. 2014)
Cera de abeja	Ester, ácidos céreos	

La adición de sustancias con propiedades plastificantes es, en general, imprescindible para dotar a las películas de un buen comportamiento mecánico en términos de flexibilidad. El plastificante más utilizado es el glicerol por su mejor estabilidad y compatibilidad con las cadenas biopoliméricas



hidrofílicas (Zegbe et al., 2015). Estas películas o recubrimientos se pueden aplicar sobre diferentes frutas para ayudar a su durabilidad, calidad microbiológica y aspecto visual (Tabla 5).

Tabla 5. Aplicación de recubrimientos comestibles a base de mucílago de *Opuntia* sobre diferentes frutas

Frutas	Condiciones de experimento	Preparación del recubrimiento	Resultado obtenido	Referencia
<b>Kiwi (<i>Actinidia deliciosa</i>)</b>  Mínimamente procesadas: peladas y cortadas en rodajas.	90 % de HR a $5 \pm 0,5$ °C, 12 días.	(T1): 30 g de extracto de mucílago puro, 500 mL de agua destilada y 50 mL de glicerol como plastificante.  (T2): 30 g de extracto de mucílago, 500 mL de agua destilada, 50 mL de glicerol adicionado con 2 mL de Tween 20 (TW).  (T control): sumergir en agua destilada.	(T1): eficacia del recubrimiento en rodajas recién cortadas, efectos positivos sobre el mantenimiento de la firmeza, contenido de ácido ascórbico, calidad visual y sabor, durante el almacenamiento a 5 °C durante 12 días.  (T2): Se observó un aumento del crecimiento microbiano, aunque por debajo del umbral de deterioro de 6.0 UFC.	(Allegra et al., 2016)
<b>Guayaba (<i>Psidium guajava</i> L.)</b>  Frutos enteros de color verde – amarillento.	Condiciones del experimento 1:  20 % de HR a 28 °C, 8 días.	(T1): 1 g de mucílago, 0,84 mL de glicerol en 20 mL de agua destilada.  (T2): 1 g de mucílago, 0,68 mL de glicerol, 0,2 g de polietilenglicol en 20 mL de agua destilada.	Experimento 1:  (T1): Pérdida considerable del peso de la fruta, retraso de la pérdida de color de la piel en la fruta, la firmeza y los SST (°Brix) se redujeron de un 75 %.  (T2): retraso de pérdida de color de la piel. Se vio, la firmeza y los SST (°Brix) se redujo de un 14 %.	(Zegbe et al., 2015)
	Condiciones del experimento 2:  20 % HR a 27 °C, 8 días.	(T1): 0,5 g de mucílago, 0,42 mL de glicerol en 40 mL de agua destilada.  (T2): 0,4 g de mucílago, 0,34 mL de glicerol y 0,1 g de polietilenglicol en 10 mL de agua destilada.	Experimento 2:  (T1) y (T2): Pérdida del peso de la fruta, retraso de la pérdida de color de la piel. Se vio afectada la calidad de la fruta, la firmeza, los SST (°Brix) aumentaron un 6%.	(Zegbe et al., 2015)

Tabla 5. Aplicación de recubrimientos comestibles a base de mucílago de *Opuntia* sobre diferentes frutas (Cont.)

Frutas	Condiciones de experimento	Preparación del recubrimiento	Resultado obtenido	Referencia
Fresas ( <i>Fragaria x ananassa</i> )  Frutos enteros.	Condiciones del experimento 1:  75 % de HR a $5 \pm 0,5$ °C, durante 10 días.	(T1): extracto de mucílago puro  (T2): extracto de mucílago de <i>Opuntia</i> con 5 % (p/p) de glicerol.	(T1) y (T2): efecto protector sobre la firmeza, el color no se vio afectado en T2 a diferencia de T1. El sabor de la fresa no se vio afectado por el recubrimiento.	(Del-Valle et al., 2005)
	Condiciones del experimento 2:  85 % de HR a $4 \pm 0,5$ °C, 12 días.	(T1): fresas sin recubrir.  (T2): mucílago de <i>Opuntia</i> con 5 % (p/p) de ácido ascórbico.	(T2): El recubrimiento aumentó el contenido de ácido ascórbico de las fresas, afecto también a los SST (°Brix) de las frutas que se mantuvieron en 7,5 °Brix, aumento al final del experimento hasta los 8,6 °Brix. Además, se observó un aumento de la acidez titulable de las frutas en un 26 %.	(Liguori et al., 2021)
Mango ( <i>Mangifera indica</i> )  Frutos enteros.	50 - 65 % de HR a $27 \pm 3$ °C, 6 semanas.	(T control): Mango sin recubrimiento  (T1): mucílago puro.  (T2): aplicación del mucílago mezclado con 5 mL de glicerol como plastificante. Glicerol a 99,5 % como plastificante (para aumentar la flexibilidad del extracto).	Se experimenta una menor pérdida de la firmeza en el T1, así como menor porcentaje de pérdida de peso. Se observa un aumento del pH en el T1 hasta 6, aproximadamente, mientras que para T2 es de 5,5 aproximadamente.	(Adetunji et al., 2012)

## 1.5. Técnica de ultrasonido (US)

El ultrasonido es una de las tecnologías emergentes con más investigación y desarrollo para la conservación de alimentos, utilizada, principalmente para la disminución de la concentración de microorganismos y la inhibición de la actividad enzimática, sin alterar las propiedades físicas, químicas y nutricionales de los alimentos (Delgado, 2012). Además de lo anteriormente citado, el uso de ultrasonidos, en adelante US, facilita la destrucción de la pared celular y de membranas biológicas, así como la destrucción de microorganismos a temperaturas inferiores. También puede

ir acompañando de procesos como, la esterilización, la extracción, altas presiones o la pasteurización.

La aplicación de ultrasonidos a sistemas líquidos provoca la cavitación acústica, que es el fenómeno de generación, crecimiento y eventual colapso de las burbujas. A medida que se propagan las ondas de ultrasonidos, las burbujas oscilan y se colapsan, lo que provoca efectos térmicos, mecánicos y químicos (Majid et al., 2015). Entre los efectos que produce el uso de ultrasonidos se encuentran las variaciones de temperatura y presión dependiendo de la frecuencia que se utilice.

Las presiones positivas y negativas producidas localmente provocan la expansión o la compresión del material, lo que provoca la ruptura de la célula. Los ultrasonidos provocan la hidrólisis del agua en el interior de las burbujas oscilantes, lo que conduce a la formación de  $H^+$  y  $OH^-$ , radicales libres que pueden ser captados en algunas reacciones químicas, por ejemplo, los radicales libres pueden ser eliminados por los aminoácidos de las enzimas que intervienen en la estructura, estabilidad, unión de sustratos o funciones catalíticas (Majid et al., 2015).

Este efecto de alteración de la sonicación es significativamente resistido por los líquidos homogéneos (Ercan & Soysal, 2011). Durante el tratamiento de sonicación, las burbujas producidas se dividen en dos tipos en función de su estructura: No lineal, formando grandes nubes de burbujas con tamaño de equilibrio durante los ciclos de presión se conocen como burbujas de cavitación estables; Las no estables, que se colapsan rápidamente y se desintegran en burbujas más pequeñas, se conocen como burbujas de cavitación interna (transitorias). Estas pequeñas burbujas se disuelven rápidamente, pero durante el estiramiento de la burbuja, la capa límite de transferencia de masa es más delgada y el área interfacial es mayor que durante el colapso de la burbuja, lo que implica que más aire se transfiere a la burbuja durante la fase de estiramiento que la que se escapa durante la fase de colapso (Tiwari & Mason, 2012).

El ultrasonido puede acelerar la transferencia de calor y masa y se ha aplicado sucesivamente al campo de extracción. Estudios recientes han demostrado que el ultrasonido mejora la transferencia de masa principalmente por efecto cavitacional. El tratamiento ultrasónico produce burbujas (llenas de gas o vapor) cuando las ondas ultrasónicas atraviesan un líquido. Este fenómeno es ampliamente conocido como cavitación. La explosión de burbujas de cavitación produce presiones y temperaturas elevadas localizadas, hasta 100 MPa y 5000 K, respectivamente. Cuando estas burbujas colapsan cerca de la superficie de la pared celular, la alta presión y la temperatura liberadas generan chorros de líquido y fuerzas de cizallamiento dirigidas hacia la superficie de la pared celular. Estos chorros de líquido y las fuerzas de cizallamiento que intervienen en este proceso provocan daños físicos en la pared celular o la membrana celular (Chemat et al., 2010).

Existe un gran interés en el ultrasonido debido al hecho de que las industrias pueden contar con equipos de ultrasonido prácticos y confiables. Hoy en día, su aparición como tecnología novedosa verde también ha llamado la atención sobre su papel en la sostenibilidad del medio ambiente. Las aplicaciones de ultrasonido se basan en tres métodos diferentes: Aplicación directa sobre el producto, acoplamiento con el dispositivo e inmersión en un baño ultrasónico. Hay una gran cantidad de aplicaciones potenciales de ultrasonido de alta intensidad en el procesamiento de alimentos (Chemat et al., 2010).

A continuación, se muestran algunas de las aplicaciones de US sobre alimentos durante su procesamiento (Tabla 6).

Comparativa y selección de métodos de extracción de mucílago de *Opuntia ficus-indica* para su uso como recubrimiento comestible

Tabla 6. Aplicaciones de ultrasonidos en el procesamiento de alimentos. Fuente: (Chemat et al., 2010)

Aplicaciones	Métodos convencionales	Objetivo	Ventajas	Productos
<b>Cocinando</b>	Estufa	Transferencia de calor uniforme	Menos tiempo  Mejora de la transferencia de calor y la calidad organoléptica	Carne, verduras
	Freidora			
	Baño María			
<b>Congelación /cristalización</b>	Congelador	Transferencia de calor uniforme	Menos tiempo  Cristales pequeños  Mejora de la difusión  Disminución rápida de la temperatura	Carne, verduras, frutas, productos lácteos
	Congelación por inmersión, por contacto			
<b>El secado</b>	Atomización	Transferencia de calor uniforme	Menos tiempo  Mejora de la calidad organoléptica  Mejora de la transferencia de calor	Productos deshidratados (frutas, verduras)
	Corriente de gas caliente			
	Congelación			
	Pulverización			
<b>Decapado /marinado</b>	Salmuera	Aumento de la transferencia de masa	Menos tiempo  Mejora de la calidad organoléptica  Estabilidad del producto	Verduras, carne, pescado, queso
<b>Desgasificación</b>	Tratamiento mecánico	Fenómeno de compresión-refacción	Menos tiempo  Mejorar la higiene	Chocolate, productos fermentados (Cerveza)
<b>Filtración</b>	Filtros (membranas semipermeables)	vibraciones	Menos tiempo  Mejora de la filtración	Líquidos (jugos)
<b>Desmoldeo</b>	Moldes de engrase	Vibraciones	Menos tiempo  Reducción de pérdidas de productos	Productos cocidos (pastel)
	Moldes de teflón			
	Moldes de sílicona			

Tabla 6. Aplicaciones de ultrasonidos en el procesamiento de alimentos. Fuente: (Chemat et al., 2010) (Cont.)

Aplicaciones	Métodos convencionales	Objetivo	Ventajas	Productos
<b>Antiespumante</b>	Tratamiento térmico	Fenómeno de cavitación	Menos tiempo  Mejorar la higiene	Bebidas carbonatadas, productos fermentados (Cerveza)
	Tratamiento químico			
	Tratamiento eléctrico			
	Tratamiento mecánico			
<b>Emulsificación</b>	Tratamiento mecánico	Fenómeno de cavitación	Menos tiempo  Estabilidad de la emulsión	Emulsiones (kétchup, mayonesa)
<b>Oxidación</b>	Contacto con el aire	Fenómeno de cavitación	Menos tiempo	Alcoholes (vino, whisky)
<b>Corte</b>	Cuchillos	Fenómeno de cavitación	Menos tiempo  Reducción de pérdidas de productos  Corte preciso y repetitivo	Productos frágiles (pastel, queso)

## 2. Objetivos

El Objetivo principal de este trabajo de final de grado es mejorar un método de extracción de mucílago, a partir de los filocladios de *Opuntia ficus-indica*, y determinar como afecta la aplicación de ultrasonidos al rendimiento de este tras su obtención.

Objetivos secundarios:

- Seleccionar un método de extracción del mucílago de la bibliografía.
- Utilizar ultrasonidos (US) para mejorar el rendimiento del mucílago.
- Valorar el pH y SST (°Brix) a partir del método seleccionado.

### 3. Materiales y métodos

Este Trabajo final de grado se estructura en tres fases (Figura 2). Se realizará una revisión bibliográfica de los métodos para la extracción del mucílago, una vez completada se continua con la selección del método a probar y la realización de pruebas preliminares, en la siguiente fase se realiza una serie de modificaciones. Por último, una tercera fase donde se introducen los ultrasonidos.

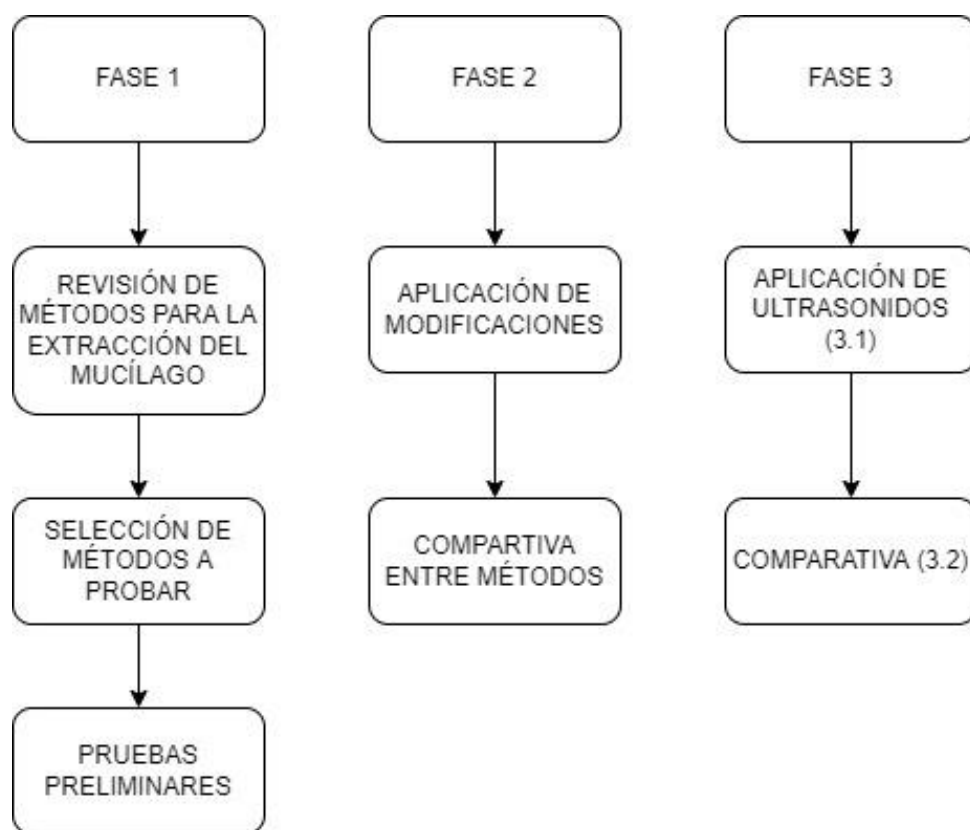
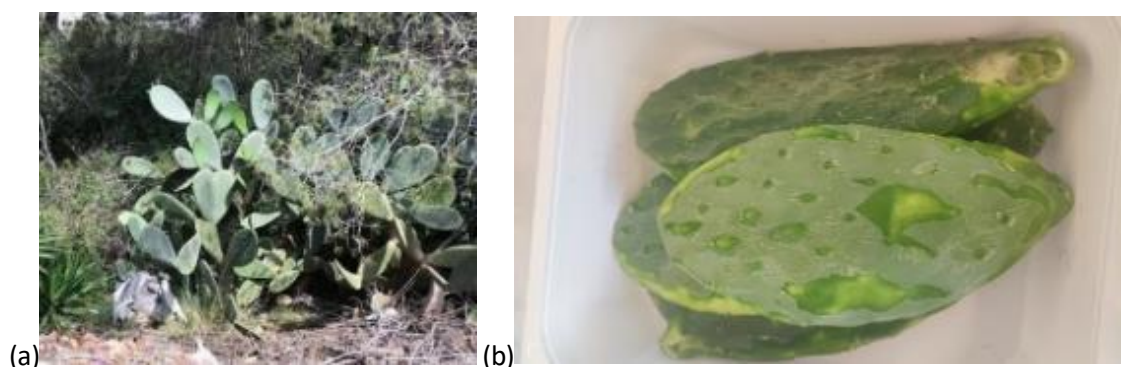


Figura 2. Fases a completar durante el desarrollo del trabajo



### 3.1. Materia Vegetal

El material vegetal a utilizar son los filocladios más jóvenes de la *Opuntia ficus-indica* (Figura 3), procedente de la zona del Garraf (Barcelona). Estos filocladios fueron previamente tratados utilizando una solución de cloro al 1% y agua destilada para su desinfección, enjuagados, desespinaados, pelados y cortados y se mantuvieron congelados hasta su utilización. Una vez iniciado cada experimento se descongelaron en la nevera durante 24 h a  $4 \pm 1$  °C.



---

Figura 3. *Opuntia ficus-indica* (a). Material vegetal después de desinfección, pelado y desespinado (b).

### 3.2. Fase 1: Revisión y selección de métodos para la extracción

#### 3.2.1. Revisión de métodos

Se realizó una búsqueda bibliográfica a través la webOS (web of science).

Se evaluaron diferentes métodos de extracción para determinar cuáles proporcionaban un mayor rendimiento de mucílago puro, así como, mayor contenido de sólidos solubles totales (SST, °Brix) y menor valor de pH.

Se realizó una selección de 5 métodos para la extracción del mucílago de los filocladios de *Opuntia ficus-indica*. Los criterios escogidos fueron basados en los procesos a seguir, el tiempo empleado y los resultados obtenidos por los diferentes autores. Así como las ventajas y desventajas que podría suponer su aplicación. En la Tabla 7, se muestran las principales características de los métodos de extracción seleccionados.

Tabla 7. Selección de métodos para la extracción del mucílago

Método	Técnicas a seguir durante la extracción	Ventajas	Desventajas
<b>Método 1: Extracción fresca del mucílago (using a modified version of Du Toit and De Wit's patented method, developed in South Africa). (Allegra et al., 2016).</b>	Lavado con agua clorada al 1 % (v/v), enjuague y desespinado.	Se obtienen un mucílago puro.	Método extenso.
	Cortar los filocladios del nopal en cubos aproximados de 2 cm <sup>3</sup> .	El disolvente utilizado, no es tan problemático para su uso en la industria alimentaria como otros disolventes.	El lavado del mucílago puede resultar complicado. Pueden quedar restos de etanol.
	Triturar en licuadora.		
	Homogenizar con agua destilada a 20 °C en proporción 1:1,5 (w/v).	El método puede resultar extenso pero las técnicas a seguir son sencillas.	Se ha de vigilar durante el lavado para no solubilizar el mucílago.
	Macerar por 90 minutos a 40 °C.	Se puede recuperar el etanol, haciendo uso de un roto-vapor.	
	Centrifugar a 1450 x g por 20 minutos.		
	Hervir el sobrenadante hasta la mitad de su volumen inicial <sup>9</sup> .	El lavado para la desinfección del filocladio contribuye a una disminución de su carga microbiológica.	

Comparativa y selección de métodos de extracción de mucílago de *Opuntia ficus-indica* para su uso como recubrimiento comestible

Tabla 7. Selección de métodos para la extracción del mucílago (Cont.)

Método	Técnicas a seguir durante la extracción	Ventajas	Desventajas
	Extracción añadiendo etanol al 99 % (v/v), en proporción 1:2.		
	Reposo de la solución a 4 °C, durante 48 h.		
	Decantar el sobrenadante.		
	Lavado del mucílago puro con agua destilada.		
<b>Método 2: (Liguori et al., 2021).</b>	Lavado con agua clorada al 1 % (v/v), enjuague y desespinado.	El lavado para la desinfección del filocladio contribuye a una disminución de su carga microbiológica.	Es posible que con la cocción al microondas no sea suficiente para la extracción del mucílago.
	Pelado: eliminación del clorénquima. para obtener un mucílago puro del parénquima.		El microondas a utilizar debe tener una potencia concreta, puede ser tedioso si no se dispone de microondas de potencia variable.
	Cortar los filocladios en cubos pequeños.	Corte en cubos pequeños para tener menos superficie y obtener más mucílago	
	Cocción en microondas a 900 W, 3 - 5 minutos, hasta ablandar.	Tiempo de realización corto.	No se obtiene un mucílago puro.
	Mezclar con homogenizador.		
	Centrifugar la pulpa obtenida a 8117 x g, 15 minutos a 4 °C.		
	Decantar el sobrenadante <sup>a</sup> y desechar el material sólido.		
	Pesar el mucílago obtenido.		
<b>Método 3: (Adetunji et al., 2012).</b>	Lavado con agua clorada al 1 % (v/v), enjuague y desespinado.	El tiempo de ejecución es corto.	Se obtienen un extracto acuoso del proceso.
	Pelado del cactus: eliminación del clorénquima.	El lavado para la desinfección del filocladio contribuye a una disminución de su carga microbiológica.	No se obtiene un mucílago puro.
	Cortar en cubos de 1 cm <sup>3</sup> .		
	Homogenizar en agua destilada 20 % (w/v).		

Tabla 7. Selección de métodos para la extracción del mucílago (Cont.)

Método	Técnicas a seguir durante la extracción	Ventajas	Desventajas
	Centrifugar 10 minutos a 4500 x g.		
	Decantar el sobrenadante.		
	Pasteurizar el sobrenadante 10 minutos a 75 °C.		
	Pesado de mucílago puro <sup>a</sup> .		
<b>Método 4: (Zegbe et al., 2015)</b>	Lavado con agua clorada al 1 % (v/v) y 2,5 mL de sulfato de cobre, enjuague y desespinado.	El lavado para la desinfección del filocladio contribuye a una disminución de su carga microbiológica.	Método extenso. La proporción de agua de macerado es mayor que en otros métodos.
	Pelado: eliminación del clorénquima.		
	Cortar en lonchas y trocear en cubos de 1 cm <sup>3</sup> .	Se obtiene un mucílago puro.	
	Sumergir los cubos en agua destilada con una proporción de 1:7 (w/v).		
	Macerar 30 segundos a 80 °C.		
	Enfriar a 16 °C durante 24 h.		
	Filtra para obtener el extracto mucilaginoso.		
	Concentrar el sobrenadante a 75 °C durante 24 h.		
	Enfriar a temperatura ambiente <sup>a</sup> .		
	Precipitar el mucílago con etanol de 95 % en proporción 1:3 (v/v).		
	Secado y triturado del mucílago.		
<b>Método 5: (Lira-Vargas et al., 2014).</b>	Lavado con agua clorada al 1 % (v/v), enjuague y desespinado.	Se obtiene un mucílago puro.	Método muy extenso.
	Pelado: eliminación del clorénquima.	El disolvente utilizado, no es tan problemático para su uso en la industria alimentaria como otros disolventes.	Utilización de equipos sofisticados, dializador y liofilizador.

Tabla 7. Selección de métodos para la extracción del mucílago (Cont.)

Método	Técnicas a seguir durante la extracción	Ventajas	Desventajas
	Cortar los filocladios en secciones de 2 x 2 cm.	Se puede recuperar el etanol utilizado, haciendo uso de un roto-vapor.	
	Macerar con agua destilada en proporción 1:2 (w/v), 15 minutos a 90 °C <sup>a</sup> .		
	Decantar el líquido.		
	Centrifugar a 4500 x g por 10 minutos <sup>a</sup> .		
	Extracción con etanol en proporción 1:1 (v/v).		
	Reposo toda la noche a 4 °C.		
	Decantar el mucílago.		
	Dializado en membrana de 5 - 6 kDa con agua desionizada por 75 h.		
	Congelación del contenido de la membrana a -35 ± 3 °C.		
	Liofilización.		

a. Una vez acabado este proceso se realizan las mediciones de pH y ° Brix.

### 3.2.2. Selección de métodos de extracción y pruebas preliminares

De los 5 métodos se escogieron 3 para la realización de pruebas preliminares a nivel experimental y así encontrar el que mejores resultados diese para proceder a su aplicación. Los métodos escogidos fueron el método n° 1: using a modified version of Du Toit and De Wit's patented method, developed in South Africa (Allegra et al., 2016), el n°3 (Adetunji et al., 2012) y el n° 4 (Zegbe et al., 2015), basado en las ventajas y desventajas descritas anteriormente (Tabla 7). Además, de acuerdo con la bibliografía se obtiene un mucílago puro. En adelante se citará el método n° 1 solo con el autor que lo ha utilizado.

Para la realización de pruebas se establece una nomenclatura de muestras (Tabla 8) por fases, para evaluar los diferentes métodos. Además, se detalla el proceso (Figura 4) seguido para cada método, durante las pruebas de extracción preliminares de la fase 1.

Tabla 8. Nomenclatura establecida durante la fase 1 del experimento

Fase	Método	Proporción agua	Proporción etanol	Nº de réplicas	Nomenclatura de las réplicas
1	1 (Allegra et al., 2016)	1:1,5	1:2	3	m1.1, m1.2, m1.3
	3 (Adetunji et al., 2012)	20 % (w/v)	-	3	m3.1, m3.2, m3.3
	4 (Zegbe et al., 2015)	1:7	1:3	3	m4.1, m4.2, m4.3

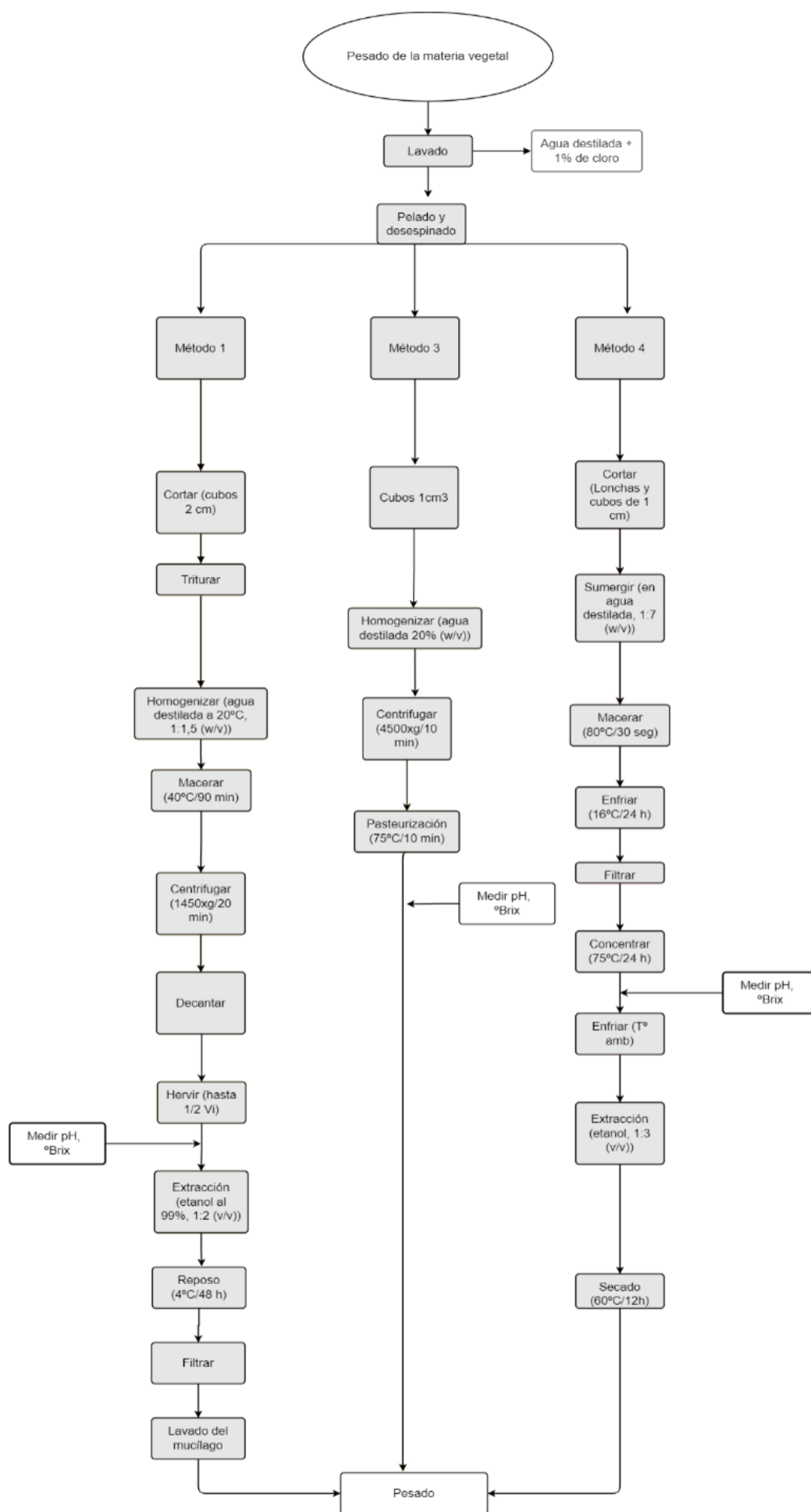


Figura 4. Diagrama experimental de los métodos de extracción de la fase 1

Para el proceso de maceración del jugo de los filocladios a temperatura de 40°C se utiliza un baño (Figura 5 (a)) para el método nº 1 (Allegra et al., 2016), y por otra parte dedo frio (Figura 5 (b)) para el proceso de enfriamiento del método nº 4 (Zegbe et al., 2015). para realizarla a una temperatura de 16 °C.

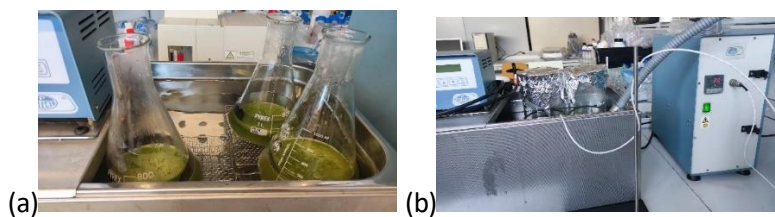


Figura 5. Macerado a 40°C (a). Utilización de dedo frio para enfriamiento (b)

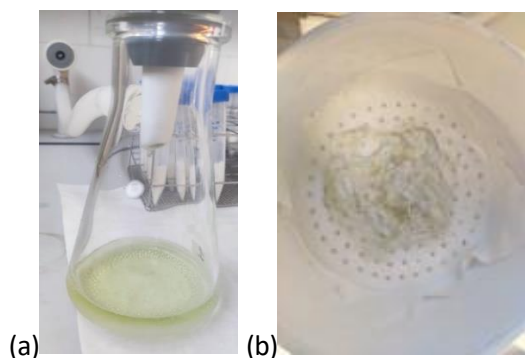


Figura 6. Matraz Kitasato (a). Embudo y filtro de papel (b). Utilización de matraz Kitasato embudo de vacío para facilitar la extracción del mucílago



### 3.3. Fase 2: Aplicación de modificaciones a los métodos y comparativa

Después de realizar pruebas preliminares con los métodos nº 1 (Allegra et al., 2016), nº 3 (Adetunji et al., 2012) y nº 4 (Zegbe et al., 2015), se escoge el método nº 1, para realizar diferentes ensayos teniendo en cuenta la proporción de agua para homogenizar, la cantidad de etanol añadida y rendimiento de mucílago, el pH y los sólidos solubles totales (SST, °Brix). El pH se midió utilizando un pHmetro CRISON GLP21 y los sólidos solubles totales (SST, °Brix) se midieron con un refractómetro ATAGO.

Para la fase 2 se realiza la modificación (Tabla 9) de las proporciones de agua del método nº 1 (Allegra et al., 2016), de 1:1,5 a 1:1, para contrastar si con ello se reduce la cantidad de etanol utilizada en el experimento.

---

Tabla 9. Nomenclatura establecida durante la fase 2 del experimento

Fase	Método	Proporción agua	Proporción etanol	Nº de réplicas	Nomenclatura de las réplicas
2	1 (Allegra et al., 2016)	1:1	1:2	3	m1.4, m1.7, m1.8

### 3.4. Fase 3: Efecto de la aplicación de US en la obtención de mucílago

Se aplicó el ultrasonido directamente sobre el producto, durante la maceración (Figura 7) utilizando el equipo Bandelin sonopulso GM70 (potencia: 70 W y frecuencia: 20 kHz), la sonda fue la MS73. La amplitud que da el equipo con la sonda es de 210 µms (Acoustic amplitude) en primer lugar, con el

“POWER”, se selecciona el porcentaje (amplitude setting %), es decir 210  $\mu\text{ms}$  sería al 100 %, seguido de “CYCLE” (el modo pulsado indicado se divide en intervalos activos y pasivos de tiempo). Por ejemplo: “pulsed cycle 1” equivale a un ciclo activo de 0,1 segundos y un pasivo de 0,9 segundos.

La mezcla se sometió a una temperatura de 40 – 42 °C aproximadamente, manteniéndola 15 minutos en un erlenmeyer, con una potencia de 50 % y ciclo de 50 segundos. Posteriormente se realizó un experimento comparativo (fase 3.2) aplicando US y sin aplicación de US (Figura 8).



---

Figura 7. Aplicación de US durante la maceración

Para la realización de pruebas de esta fase se establece una nomenclatura de muestras (Tabla 10) por fases, para evaluar el método 1 aplicando US y sin aplicar US. Además, se detallan los procesos (Figura 8) seguidos.

Tabla 10. Nomenclatura establecida durante la fase 3 del experimento

Fase	Método	Proporción agua	Proporción etanol	Nº de réplicas	Nomenclatura de las réplicas
3.1	1 (con US)	1:1	1:2	3	m1.9, m1.10, m1.11
	1 (sin US)	1:1	1:2	3	m1.9, m1.10, m1.11
3.2	1 (con US)	1:1	1:4	4	m1.12, m1.13, m1.14, m1.15
	1 (sin US) (Método nº 1 (Allegra et al., 2016))	1:1,5	1:2	4	m1.16, m1.17, m1.18, m1.19

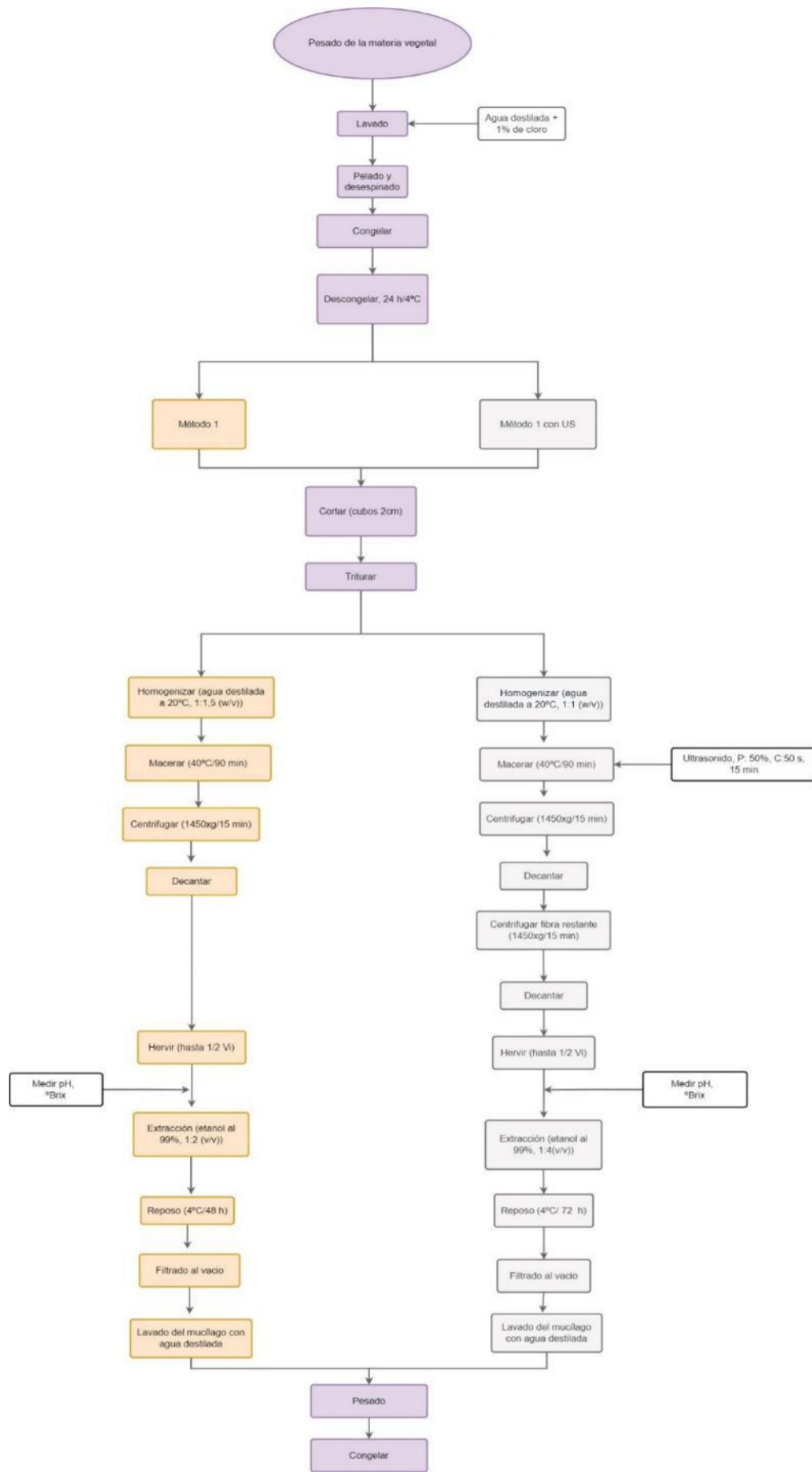


Figura 8. Diagrama de método nº 1 (Allegra et al., 2016), sin aplicación de US y método nº 1 modificado aplicando US. Fase 3: comparativa (3.2)

### 3.5. Análisis estadístico

Los datos experimentales se analizaron con el programa Minitab 19. Se realizó el análisis de varianza ANOVA de un factor comparando los métodos de extracción utilizados, haciendo comparativa para medias de Tukey con nivel de confianza de 95 %, considerando  $P < \alpha$ , con  $\alpha = 0,05$ , para datos significativamente diferentes. En cada fase se presentan tablas con réplicas para cada método realizado.

## 4. Resultados y discusión

Durante la realización de los experimentos las variables a tener en cuenta fueron pH, sólidos solubles totales (SST, °Brix), y el rendimiento de mucílago obtenido, aplicando también el uso de ultrasonidos para la mejora del rendimiento, además de las proporciones de agua y de etanol utilizados para la extracción.

El rendimiento de mucílago se calculó con la siguiente ecuación:

$$\% R = \frac{\text{Peso de mucílago}}{\text{Peso del material vegetal}} \cdot 100 \%$$

Donde:

*% R*: rendimiento de mucílago fresco.

*Peso del material vegetal*: peso del material vegetal limpio, cortado y antes de congelar.

*Peso de mucílago*: peso obtenido después de la filtración al vacío.

## 4.1. Fase 1: Resultados preliminares de métodos seleccionados para la extracción

A continuación, en la tabla 11, se muestran diferencias cualitativas que se obtuvieron con los métodos n° 3 (Adetunji et al.,2012), n° 1 (Allegra et al., 2016), y n° 4 (Zegbe et al., 2015), en orden de aplicación, así como, imágenes del mucílago obtenido a partir de cada método.

Tabla 11. Diferencias cualitativas obtenidas durante la aplicación del método n° 3 (Adetunji et al.,2012), n° 1 (Allegra et al., 2016), y n° 4 (Zegbe et al., 2015). Fase 1




Método	Diferencias cualitativas obtenidas durante la aplicación de los métodos de extracción
n° 3 (Adetunji et al.,2012).	<p>Se obtiene extracto acuoso de mucílago.</p> 
	<p>Método corto. La aplicación fue de 3 h aproximadamente.</p>
n° 1 (Allegra et al., 2016).	<p>Se observa más espeso que la homogenización para el método 3 (Adetunji et al.,2012). La dilución con agua destilada es en menor proporción.</p> <p>Se ha centrifugado la fibra sobrante de la primera sesión de centrifuga, para la réplica 2 y 3. Se ha obtenido más cantidad de extracto acuoso de mucílago. El sobrenadante de la réplica 1 se dividió en 3 volúmenes.</p>  <p>El extracto acuoso decantado de las réplicas 2 y 3 se hierven en un volumen para cada uno. Se observa un aumento de la coloración del macerado.</p>  <p>Se realiza decantación del etanol de la muestra 1, hasta la agregación del mucílago, se procede al lavado por filtrado simple. Se obtienen una masa blancuzca para la muestra de la réplica 1 (a). El tiempo de filtrado es aproximadamente de 2,5 - 3 h. Para las muestras 2 y 3, se prueba con filtrado al vacío, lo que reduce el tiempo a 40 minutos. Se pesan las 3 muestras y se guardan en el congelador.</p> <p>El tiempo de filtración depende de cómo de agregado este el mucílago después de realizar la extracción con etanol. En las muestras de las réplicas 2 y 3 (b), se observó una menor extracción del mucílago utilizando las mismas proporciones de etanol, por consiguiente, una menor agregación del mucílago. En estos casos queda una parte de extracto sin actuar con el etanol, de modo que, al hacer la filtración,</p>

Tabla 11. Diferencias cualitativas obtenidas durante la aplicación del método nº 3 (Adetunji et al.,2012), nº 1 (Allegra et al., 2016), y nº 4 (Zegbe et al., 2015). Fase 1 (Cont.)

Método	Diferencias cualitativas obtenidas durante la aplicación de los métodos de extracción
<p>nº 1 (Allegra et al., 2016) (continuación).</p>	<p>no queda tan agregado como la réplica de la muestra 1 (a) y amarillo-blancuzco, si no, que se muestra con una textura más gelatinosa y coloración más verdosa, como se muestra en la imagen (b).</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;">    </div> <p>(a) (b) (c)</p> <p>Método extenso. El tiempo de aplicación es de 65 horas, aproximadamente.</p>
<p>nº 4 (Zegbe et al., 2015).</p>	<p>Este método utiliza una proporción bastante elevada de agua. Se realizo la maceración en placa calefactora. Se observa un macerado viscoso, pero menos denso que el macerado para el método nº 1 (Allegra et al., 2016).</p>  <p>Se obtienen un extracto acuoso de mucílago.</p>  <p>Se obtiene un mucílago más concentrado (b) que en método nº 1 (Allegra et al., 2016), pero las cantidades de etanol para la extracción son exesivas.</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;">   </div> <p>(a) (b)</p> <p>Es un método extenso. El tiempo de aplicación es de 5 días, aproximadamente.</p>

En las primeras pruebas preliminares se realizaron 3 réplicas de cada método. A continuación, se realizan las comparativas gráficas de los experimentos.



#### 4.1.1. pH y SST (°Brix)

Se observa en la figura 9, que, para el método n° 1 (Allegra et al., 2016), los valores de pH se encuentran por debajo de 4 y los SST (°Brix) entre 3,5 y 3,8, aproximadamente. A diferencia del método n° 3 (Adetunji et al., 2012) y método n° 4 (Zegbe et al., 2015), a priori, el método 1, es el que mejor resultados muestra para estos dos parámetros, valores de pH inferiores a 4 y SST (°Brix) mayores a 0,75.

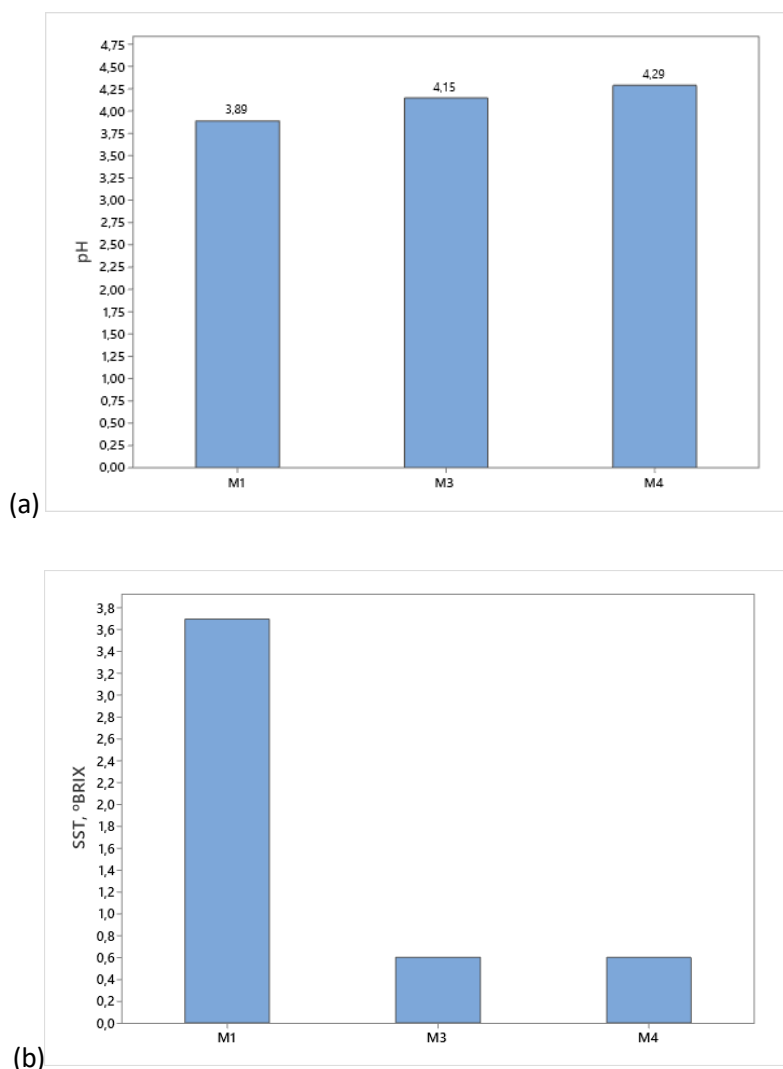


Figura 9. pH (a) y sólidos solubles totales (SST, °Brix) (b) de experimentos preliminares para método n° 1 (Allegra et al., 2016), método n° 3 (Adetunji et al., 2012), y método n° 4. (Zegbe et al., 2015)

Los valores de pH obtenidos (Figura 9) en el método nº4 (Zegbe et al., 2015) son cercanos a los obtenidos por Rodríguez-González et al., 2014; Rodríguez, et al., 2011, de 4,45, donde se utilizaron proporciones (*Opuntia*/agua) (w/v) para macerado 1:2, mientras que para el método nº 4 fue de 1:7.

#### 4.1.2. Rendimiento

El método nº 3 (Adetunji et al., 2012) no se tuvo en cuenta para esta comparativa, se descarta porque los rendimientos de mucílago se obtuvieron en forma de extracto acuoso, en cambio, para los métodos nº 1 (Allegra et al., 2016) y nº 4 (Zegbe et al., 2015), se extrajo un mucílago sólido. El formato sólido facilita su almacenamiento. Además, se pueden realizar mezclas más fácilmente con otro tipo de ingredientes, como los mencionados en la tabla 4. En caso de realizar una preparación para un recubrimiento comestible, la cantidad de agua que contiene el extracto acuoso podría afectar a algún ingrediente de matriz no polar.

En cuanto a los rendimientos (Figura 10 (a)), se observa que del método nº 1 (Allegra et al., 2016) se obtiene un 3,8 %, con un menor gasto de etanol (Figura 10 (b)), para la extracción, contrario a lo que ocurre con el método nº 4 (Zegbe et al., 2015), donde se utilizó más de 2500 mL de este producto y el rendimiento obtenido es inferior al 1,5 %.

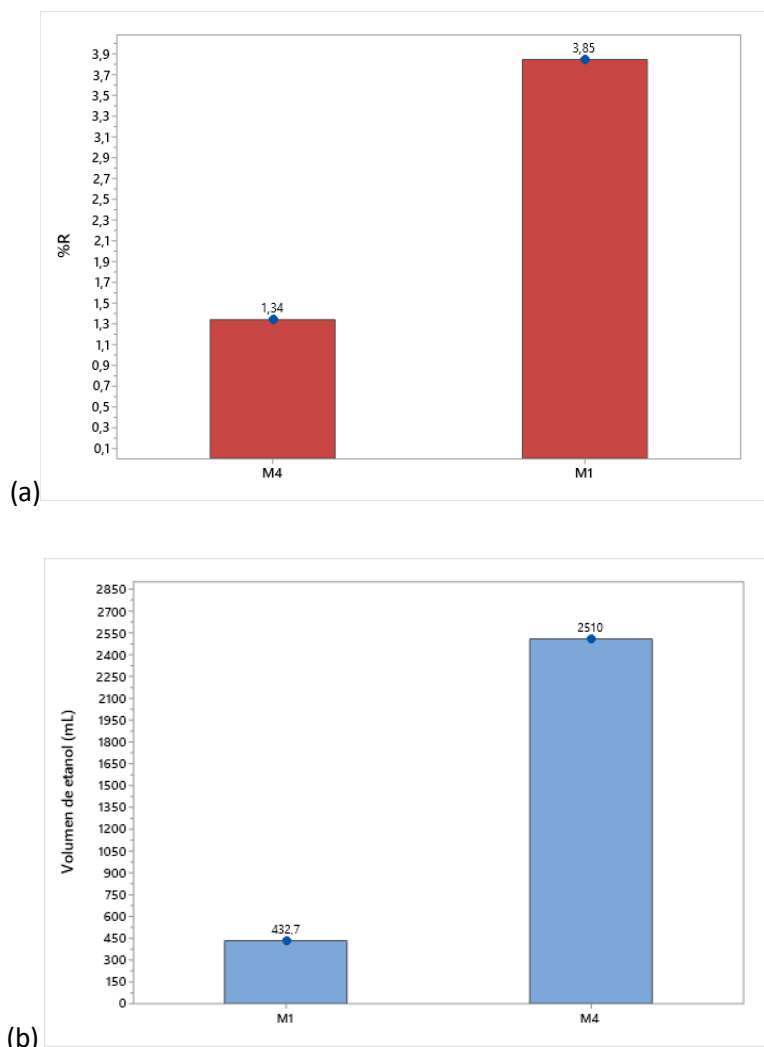


Figura 10. Rendimiento medio de mucílago (a) de método n° 1 (Allegra et al., 2016) y método n° 4 (Zegbe et al., 2015), y volúmenes de etanol (b) utilizados

No obstante, los rendimientos (Figura 10 (a)) son mayores a los informados por Sáenz & Sepulveda, 1993, en cuyos estudios en cascara de frutos de nopal y filocladios, reportaron rendimientos de mucílago de 1,0 % y 1,2 % en peso fresco (pf), respectivamente. En estudios más recientes, Sepúlveda et al., 2007 reportaron 1,48 % de rendimiento promedio de mucílago con la utilización de alcohol isopropílico, en lugar de utilizar etanol, ya que este último resulta ser más costoso. Otros autores como Rodríguez-González et al., 2014., obtuvieron valores de 0,5 - 0,6 %, bastante bajos, en comparación con los dos métodos presentados anteriormente.

Diferentes autores han utilizado diversos métodos para la extracción de mucílagos que han influido en el rendimiento obtenido (Cárdenas et al., 1998). Otros autores como Sáenz et al., 2004, también han observado que el jugo de *Opuntia* extraído de los filocladios cambia en su viscosidad dependiendo de la cantidad de agua que recibe la planta, es decir, con menor lluvia se midió mayor viscosidad. La temperatura también afecta el contenido de mucílago del filocladio y la producción de mucílago aumenta durante la adaptación a bajas temperaturas.

En cuanto a los resultados obtenidos, se esperaba obtener más del 1 % de rendimiento realizando el método nº 1 (Allegra et al., 2016), debido al tiempo y temperatura de maceración de la mezcla, posiblemente con esto se consiguió extraer más mucílago. En cambio, con el método nº 4 (Zegbe et al., 2015), el tiempo de extracción fue muy corto para el macerado, aunque el tiempo de concentración fue elevado, no se logró obtener suficiente mucílago, durante este proceso.

## **4.2. Fase 2: Resultados de aplicación de modificaciones a los métodos y comparativa**

A continuación, se observa una comparativa de pH, SST (°Brix) (Figura 11) y rendimientos obtenidos (Figura 12) del método nº1 (Allegra et al., 2016), cambiando las proporciones de agua para la homogenización del macerado, pasando de 1:1,5 (w/v) a 1:1 (w/v).

### **4.2.1. pH y SST (°Brix)**

Para los parámetros como pH y SST (°Brix) (Figura 11), después de cambiar las proporciones de *Opuntia*/agua de 1:1,5 a 1:1, se observó un ligero aumento en los valores de pH y SST (°Brix) para la modificación a proporciones 1:1, en la comparativa que se muestra a continuación, donde destacan

los valores medios en la gráfica. El pH con proporciones de *Opuntia*/agua 1:1 (pH M1, 1:1), es de 4,04 y el valor de pH para proporciones 1:1,5, (pH M1, 1:1,5) es de 3,9, aproximadamente. En cuanto a los resultados arrojados para SST (°Brix) la media de la muestra con proporciones 1:1 (SST M1, 1:1) esta aproximadamente entre 4,00 - 4,05; y la media para la muestra SST M1, 1:1,5, esta entre 3,65 - 3,70.

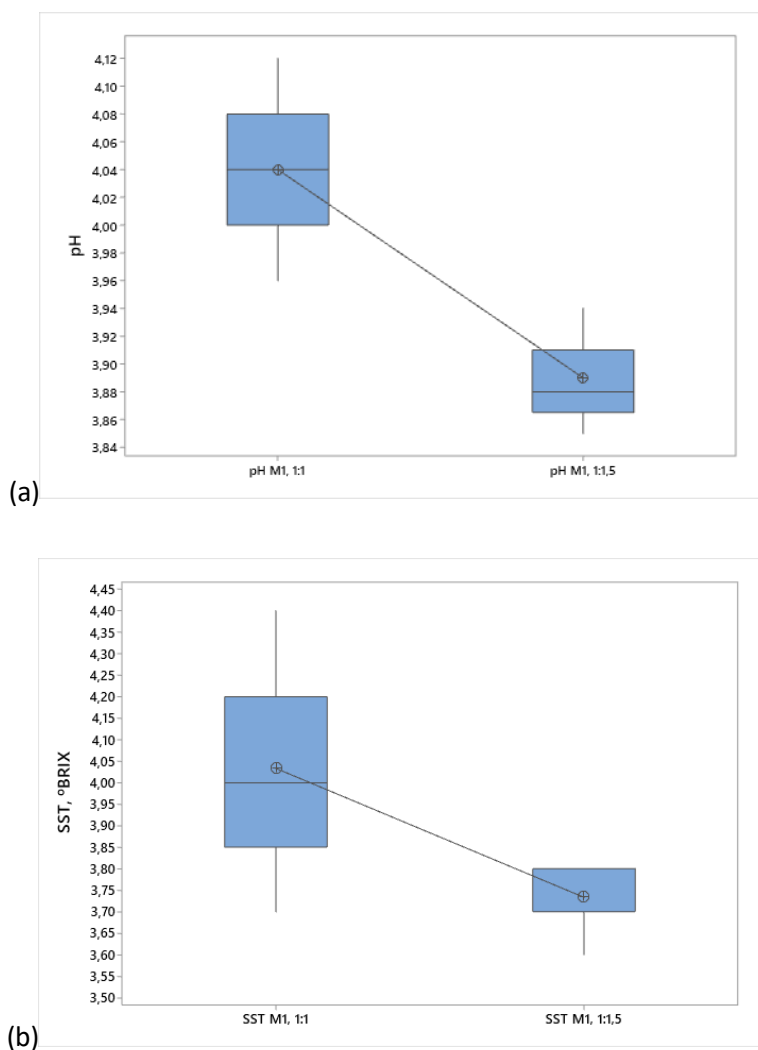


Figura 11. Comparativa de pH (a) y SST (°Brix) (b) con proporciones *Opuntia*/agua(w/v) 1:1,5 del método n° 1 (Allegra et al., 2016) y con proporciones 1:1 de método modificado

Para contrastar este resultado (Figura 11) se realiza un test ANOVA para la comparación de medias simulando igualdad de varianzas, con una confianza del 95 % y un valor  $\alpha = 0,05$ . Para la comparativa entre valores de pH del experimento, se obtuvo como resultado un valor  $P = 0,048$ , lo cual indica que hay diferencias significativas entre ambos parámetros. En cuanto al resultado arrojado para la comparativa de sólidos solubles totales, SST ( $^{\circ}$ Brix), no se observan diferencias significativas, en este caso se ha obtenido un valor  $P = 0,233$ .

#### 4.2.2. Rendimiento

En cuanto al rendimiento de mucílago obtenido (Figura 12) se obtuvo una media superior a 7 % para las 3 muestras de método modificado (M1 (1:1)), con proporción de *Opuntia*/agua de 1:1 y una media de 3,9 % para las 3 muestras (M1 (1:1,5) método n°1 (Allegra et al., 2016) ) con proporción de *Opuntia*/agua de 1:1,5. Se realizó un test ANOVA para comparar los rendimientos cambiando las proporciones (w/v) de *Opuntia*/agua. El test de significancia de comparación de medias, con un valor  $\alpha = 0,05$ , además haciendo la comparativa entre parejas de Tukey y una confianza del 95 %, dio como resultado valores poco significativos, con  $P = 0,242$ .

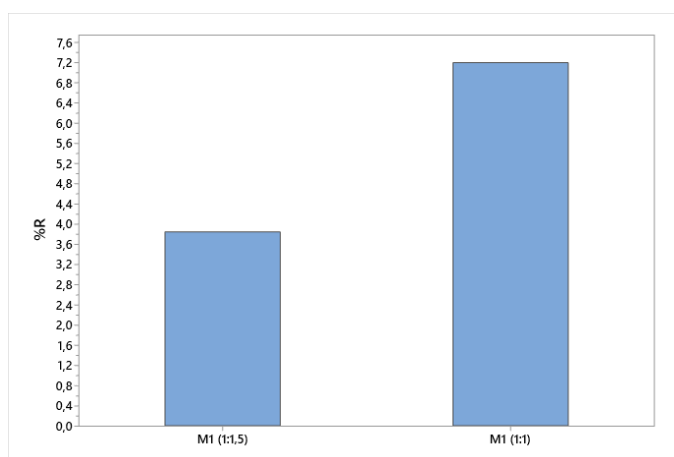


Figura 12. Comparativa de rendimientos con proporciones *Opuntia*/agua(w/v) 1:1,5 y 1:1 del método n° 1 (Allegra et al., 2016)

En este caso los valores de rendimientos fueron superiores a los obtenidos por Sepúlveda et al., 2007, que reportó porcentajes entre el 1,33 % - 1,56 % utilizando etanol de 95 % (v/v) con proporciones de 1:3 y 1:4.

Para los valores de SST (°Brix) obtenidos para el método n° 1 modificado, con proporciones de agua 1:1, se esperaba que los valores fuesen superiores a 0,5 °Brix, como se observa en la figura 11, y superiores a los obtenidos por otros autores como Carmona et al., 2021, que reportó baja cantidad de SST (°Brix), de 0,8, obtenidos del mucílago del filocladio y pH de 6,1. Para el mismo método modificado se obtuvo valores de pH inferiores (Figura 11) a los reportados por Carmona et al., 2021.

Según Sáenz et al., 2004, el contenido de mucílago del filocladio de nopal cambia con el manejo del cultivo, pero también depende de la temperatura y del contenido de agua del suelo. Otros autores como Goldstein et al., 1991, mostraron que hay un aumento en el contenido de mucílago de filocladio en respuesta a la sequía.

La temperatura también afecta el contenido de mucílago del filocladio y la producción de mucílago aumenta durante la adaptación a bajas temperaturas (Sáenz et al., 2004). A pesar de la evidencia de una variabilidad ambiental del contenido y las características del mucílago, no hay información sobre su variabilidad estacional, que es particularmente importante en vista de su uso industrial en la industria alimentaria (Messina et al., 2021).


A continuación, se muestran los resultados cualitativos obtenidos de los experimentos realizados en esta fase (Tabla 12).

Tabla 12. Resultados cualitativos obtenidos durante la fase 2 para el método nº 1 modificado

Método	Diferencias cualitativas obtenidas durante la aplicación del método de extracción.
<p><b>Método nº 1 modificado:</b></p> <p>Se cambia la proporción de agua de macerado de 1:1,5 a 1:1.</p>	<p>Este experimento, inicialmente, constaba de 3 réplicas, m1.4, m1.5 y m1.6. Para la extracción de la muestra m1.4, se utilizó etanol al 99 %, obteniéndose un mucílago puro.</p>  <p>Para las muestras m1.5 y m1.6, se reutiliza el etanol que previamente había servido para la extracción de las muestras m1.1, m1.2 y m1.3, en las mismas proporciones, 1:2. Los resultados obtenidos para las dos últimas muestras no son los esperados ya que la extracción de estas no fue completa. Se obtiene un extracto acuoso de mucílago. En la siguiente figura se observa el resultado obtenido.</p>  <p>En cuanto al color, según Sepúlveda et al., 2007, el etanol disuelve parte de la clorofila presente en los filocladios, lo que le da al mucílago una tonalidad amarillo claro. Sin embargo como no se utilizó etanol al 99 %, no se consiguió esta tonalidad.</p> <p>Al no obtener muestras de mejor consistencia de m1.5 y m1.6 se descartan estas dos. Se vuelve a repetir el experimento realizando otras dos réplicas utilizando etanol al 99 % con las nuevas muestras m1.7 y m1.8. Para estas últimas se realiza una extracción en etanol de 72 h.</p> 



Tabla 12. Resultados cualitativos obtenidos con durante la fase 2 para el método n° 1 modificado (Cont.)

Método	Diferencias cualitativas obtenidas durante la aplicación del método de extracción.
<p><b>Método n° 1 modificado:</b></p> <p>Se cambia la proporción de agua de macerado de 1:1,5 a 1:1.</p>	<p>Para estas se obtienen mucílago puro, mediante filtrado al vacío. Se observa como una parte del mucílago es blancuzca (a) y la otra es verdosa(b) y con textura más gelatinosa o de gel (c).</p> <div style="text-align: center;">  <p>(a)                      (b)                      (c)</p> </div> <p>El tiempo de duración del experimento es extenso, aproximadamente 4 días.</p>

### 4.3. Fase 3: Resultados del efecto de la aplicación de US en los métodos de extracción

#### 4.3.1. Fase 3.1: Resultados preliminares del efecto de aplicación de US

Para los resultados con US se realizaron 2 experimentos comparativos. El primero, como se muestra en la Tabla 13, haciendo 3 réplicas del experimento con proporciones de agua para macerado de 1:1 y de etanol para la extracción de 1:2.

El segundo experimento como se muestra en la Tabla 14 haciendo 4 réplicas con proporciones de agua 1:1,5 y 1:1 y de etanol 1:2 y 1:4 respectivamente.

Tabla 13. Comparativa de resultados con US y sin US con proporción de agua para macerado de 1:1

Método	Proporción de agua	Proporción de etanol	pH	SST (°Brix)	% R
1 sin US	1:1	1:2	3,97	4,16	7,21
1 con US	1:1	1:2	4,12	3,93	5,14

#### 4.3.1.1. pH y SST (°Brix)

A continuación, se observan los resultados de pH (Figura 13(a)) y sólidos solubles totales (SST, °Brix) (Figura 13 (b)) obtenidos con aplicación de US y sin US. En cuanto a la comparativa (Figura 13 (a)) se observa que los valores de pH del mucílago de cada réplica, utilizando US son mayores a los obtenidos para las réplicas sin aplicar US.

En los valores de SST (°Brix) (Figura 13 (b)), la réplica 1 con US, muestra que los datos son superiores a los obtenidos sin US, mientras que para las réplicas 2 y 3, los valores obtenidos son mayores para el experimento sin aplicar US que con aplicación de US.

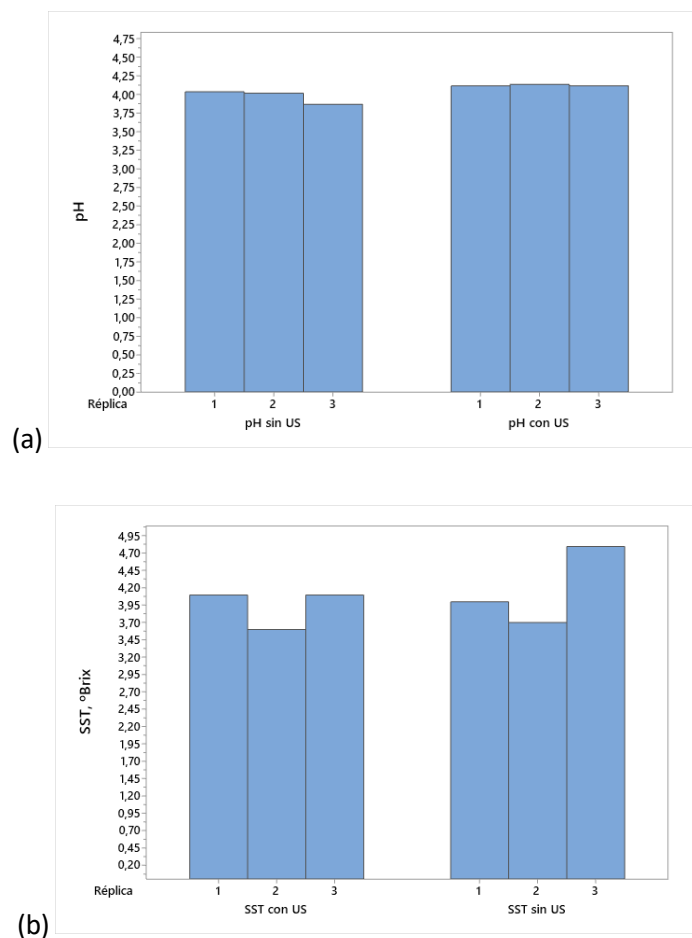


Figura 13. Comparativa de pH (a) y SST (°Brix) (b) con proporciones *Opuntia*/agua (w/v) 1:1 para método 1 modificado, con US y sin US

Al realizar el test ANOVA para la comparativa de medias de valores de pH entre los dos experimentos (sin US y con US), el test de significancia con  $\alpha = 0,05$  y  $P = 0,05$ , además haciendo un test de comparación de parejas de Tukey, con una confianza del 95 %, se encontró que los valores no son significativamente diferentes, ya que  $P = \alpha$ . No obstante, y como indica la Figura 13 (a), se observa un leve aumento para los valores de pH. En cuanto a los resultados del test de significancia de medias para los valores de SST (°Brix), se obtiene un valor  $P = 0,561$ , y  $\alpha = 0,05$ , obteniendo resultados poco significativos dado que el valor  $P > \alpha$ .

### 4.3.1.2. Rendimiento

Para los valores de rendimiento (Figura 14 (a)) se observa, a priori, que ha mejorado con el uso de ultrasonidos para las réplicas 1 y 2, mientras que la réplica 3 sin US el rendimiento se muestra más alto que para la misma réplica con la aplicación de US. Esta diferencia puede deberse a las variaciones de temperaturas durante su crecimiento o el tamaño del filocladio.

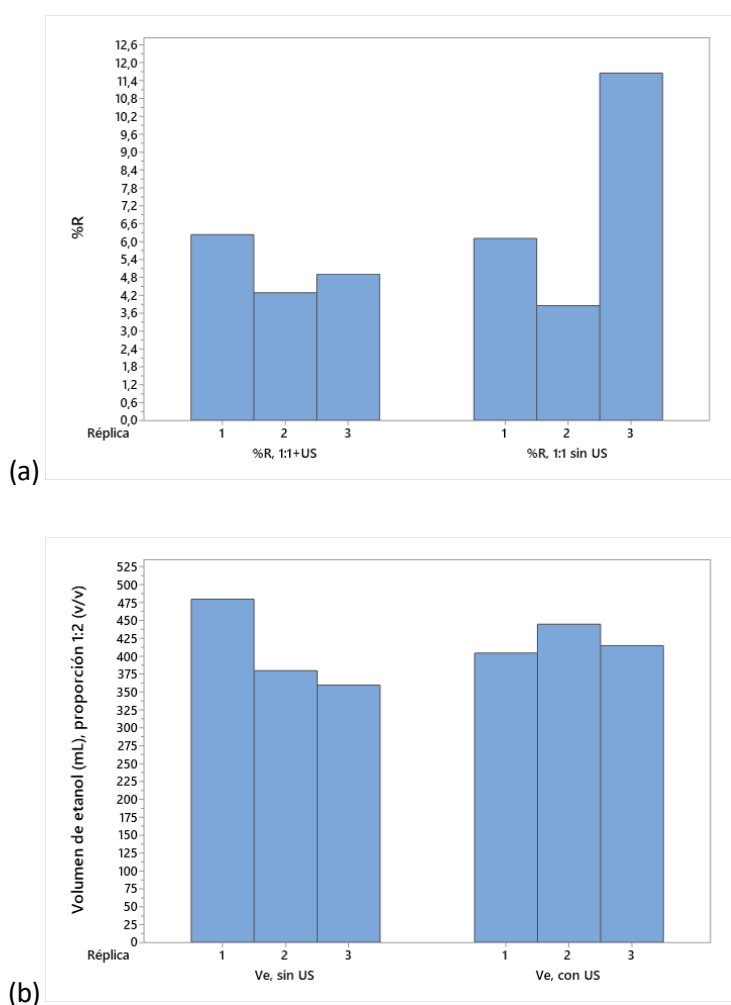


Figura 14. Rendimientos obtenidos (a) para las réplicas del experimento con proporciones *Opuntia*/agua (w/v) 1:1 para método nº 1 modificado, con US y sin US, y volúmenes de etanol utilizados (b)

En cuanto al volumen de etanol (Figura 14 (b)) utilizado para la extracción, se muestra que se han utilizado aproximadamente 100 mL más, para cada muestra con el uso de US. Los valores medios (Tabla 13) expresan que con el experimento sin US se obtiene mayor rendimiento. Esto se debe a que el valor obtenido de la réplica 3 del experimento sin US es bastante alto, se muestra variabilidad entre datos obtenidos. En el test de comparativa ANOVA de medias, para los valores de rendimientos obtenidos, con un nivel de confianza del 95 % y valor  $P = 0,437$ , indicó resultados poco significativos.

#### 4.3.2. Fase 3.2: Resultados de la comparativa entre métodos de extracción de mucílago aplicando US y sin US

Para el siguiente experimento (Tabla 14) se hicieron 4 réplicas para ambos ensayos, con US y sin US.

---

Tabla 14. Comparativa de resultados sin US y proporción de agua 1:1,5; y con US y proporción de agua 1:1

Método	Proporción de agua	Proporción de etanol	pH	SST (°Brix)	% R
1 sin US (Método n° 1 (Allegra et al., 2016))	1:1,5	1:2	4,36	3,13	2,90
1 con US	1:1	1:4	4,36	3,57	4,28

### 4.3.2.1. pH y SST (°Brix)

En cuanto a la comparativa siguiente (Figura 15 (a)) se observa que para las réplicas 1 y 2 los valores de pH utilizando US son menores a los obtenidos para las réplicas sin aplicar ultrasonidos. En los valores de SST (°Brix) (Figura 15 (b)), las réplicas 1, 3 y 4, con US, muestra que los datos son superiores a los obtenidos sin US, mientras que para la réplica 2, los valores obtenidos son mayores para el experimento sin US que con US.

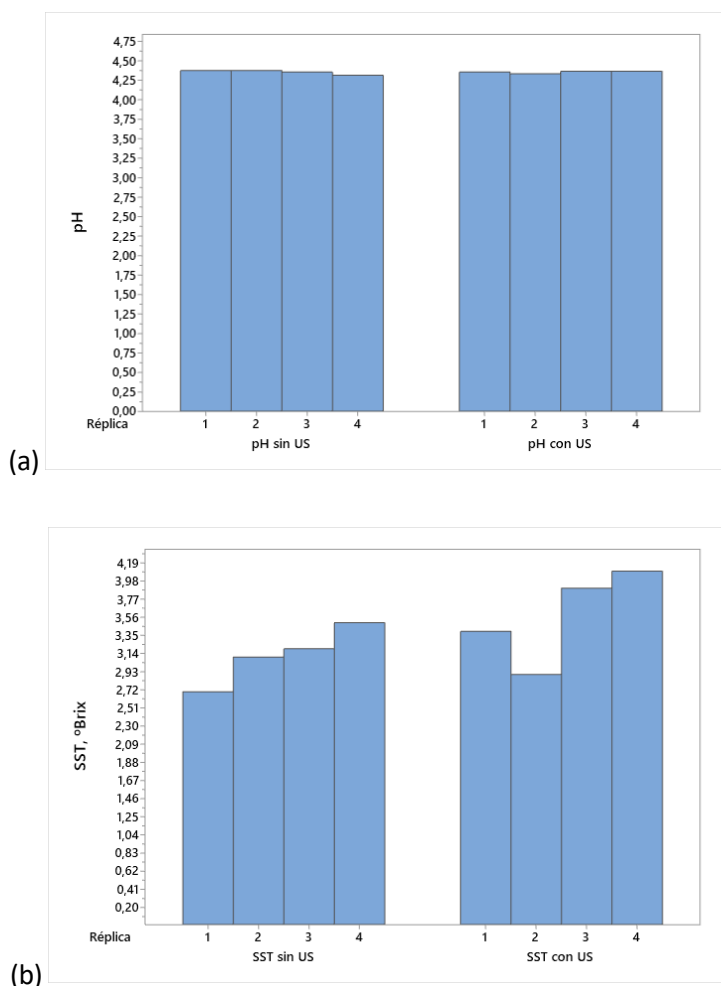


Figura 15. Comparativa de valores medios de pH (a) y SST (°Brix) (b) de método n° 1 modificado con proporción *Opuntia*/agua (w/v) 1:1 con US y método n° 1 (Allegra et al., 2016) con proporción 1:1,5 sin US

Al realizar el test ANOVA para la comparativa de medias de valores de pH entre los dos experimentos (sin US y con US), el test de significancia con valores de  $\alpha = 0,05$  y valor  $P = 1,00$ , además haciendo un test de comparación de parejas de Tukey, con una confianza del 95 %, se encontró que los valores no son significativamente diferentes, ya que  $P > \alpha$ . No obstante, y como indica la Figura 15 (a), se observa una leve disminución en los valores de pH del experimento con US. En cuanto a los resultados del test de significancia de medias para los valores de SST (°Brix), se realiza comparando entre parejas de Tukey con una significancia de 95 %, valor  $P = 0,204$ , arrojando datos poco significativos.

#### 4.3.2.2. Rendimiento

Se observa, a priori, que el rendimiento obtenido (Figura 16 (a)) ha mejorado con el uso de ultrasonidos para las réplicas 1 y 3. Esto puede deberse a que, el uso de ultrasonidos ha favorecido la liberación de mucílago. El uso de US facilita la destrucción de la pared celular y de membranas biológicas de los filocladios. La cantidad de mucílago obtenido también puede verse favorecido por el volumen de etanol utilizado, como se muestra en la figura 16 (b), en la que se utilizó 200 mL aproximadamente, de más para cada muestra. En el test de comparativa de medias para los valores de rendimientos obtenidos, con un nivel de confianza del 95 %, valores  $P = 0,155$  y  $\alpha = 0,05$ . Las diferencias no fueron significativas.

La variabilidad entre datos obtenidos puede deberse a la temperatura de crecimiento de la planta, durante los meses de otoño, el tipo de suelo, el tamaño del filocladio o la edad de este. No obstante, se quiso evitar esta variación mezclando los trozos ya cortados de los filocladios.

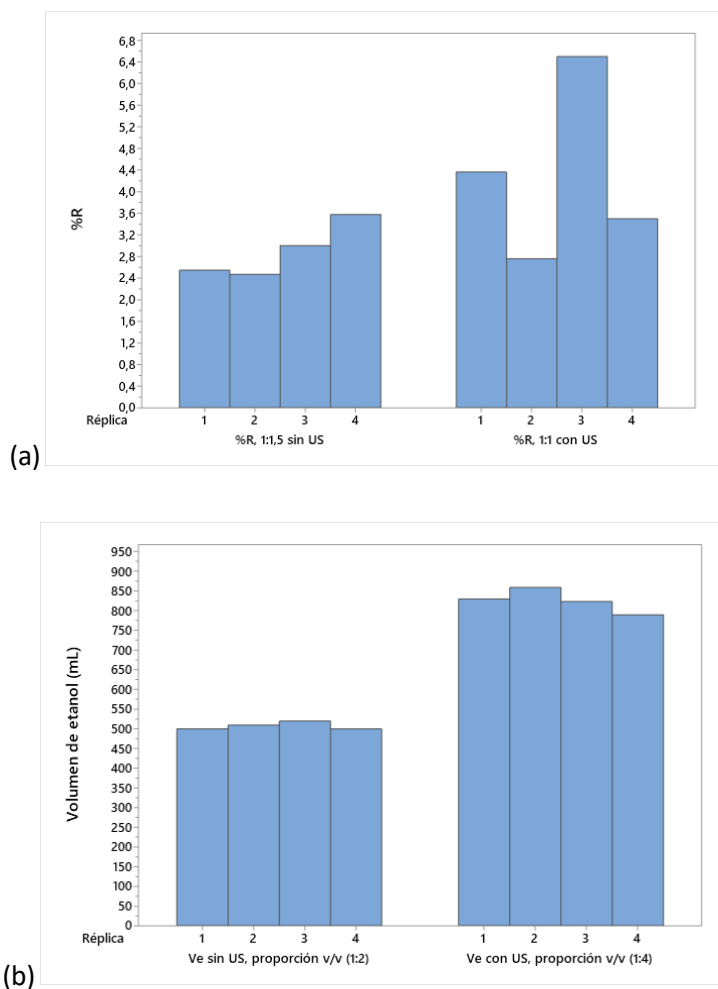


Figura 16. Rendimientos obtenidos (a) para las réplicas del método nº 1 (Allegra et al., 2016) con proporción 1:1,5 sin US y método nº 1 modificado con proporción *Opuntia*/agua(w/v) 1:1 con US; y volúmenes de etanol utilizados (b)

En cuanto a la figura 17 se muestra que con el uso de US mejora el rendimiento del mucílago obtenido, en un tiempo inferior a 6 días de extracción (Figura 17(b)), además mejora el color, obteniéndose una tonalidad más blanquizca y mayor pureza (Tabla 15. Figura c y d)



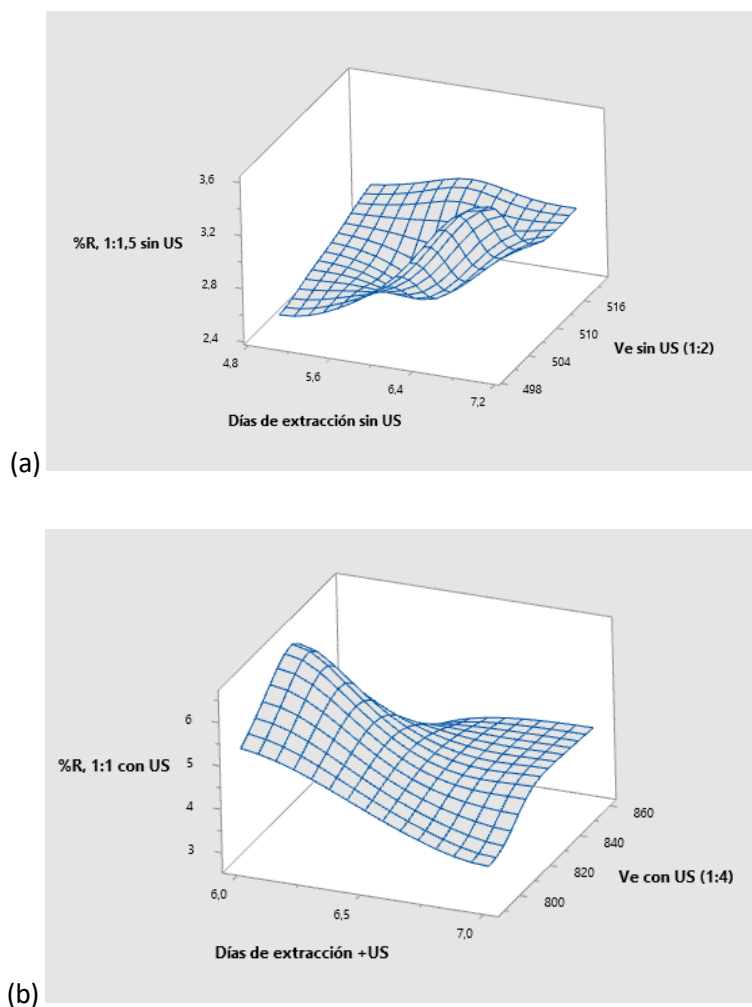


Figura 17. Comparativa entre tiempo de extracción, volumen de etanol utilizado y rendimiento obtenido para el experimento sin US (a) y con US (b)

La EAU (extracción asistida por ultrasonidos) es altamente eficiente en términos de tiempo, energía y ahorro de costos, cantidad de rendimiento y mayor pureza del producto final (Bayar et al., 2017b). A diferencia de los métodos de extracción convencionales, la extracción asistida por ultrasonido es un método simple y de bajo costo, que permite disminuir el tiempo y consumo del disolvente, con un aumento en el rendimiento de extracción (Živković et al., 2019). Hoy en día, se utilizan varias técnicas, como la extracción asistida por ultrasonido, para aumentar la eficacia del proceso de extracción y la calidad del producto final (Oliveira et al., 2016).


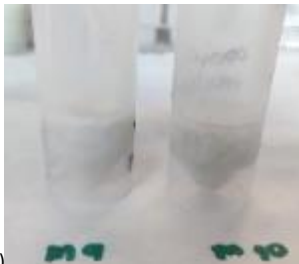


Otros autores como Corona-Jiménez et al., 2016 han utilizado la extracción asistida por ultrasonidos para obtener compuestos fenólicos a partir de materia vegetal, como la chía (*Salvia hispánica L.*). en este caso se utilizó sonda ultrasónica, con frecuencia de 24 kHz y con potencia máxima de 400 W. Živković et al., 2019, también utilizó ultrasonidos para la extracción de compuestos fenólicos de la raíz de genciana (*Gentiana lutea L.*), con un baño ultrasónico con potencia de 35 W y frecuencia de 40 kHz. La diferencia con este trabajo es la utilización de sonda en lugar de baño y que, la sonda se utilizó durante el proceso de maceración para los experimentos de la fase 3, y no para el proceso de extracción con etanol. Ambos autores utilizaron etanol para la extracción, que, en estos casos sirve para extraer los polifenoles más rápidamente, mientras que para este trabajo se utilizó como precipitador de la fibra durante el proceso de extracción.

Otros autores como Rojas, et al., 2019 reportaron la utilización de sonda ultrasónica, con potencia de 130 W y frecuencia de 20 kHz, en contacto con el extracto acuoso de sanky (*Corryocactus brevistylus*) para la extracción de compuestos fenólicos. Se reportó buena eficiencia gracias a la extracción asistida por ultrasonidos (EAU), haciendo referencia al tiempo de extracción como un factor importante para la obtención de estos compuestos.

Como método para la obtención del mucílago se presenta el método nº 1 modificado con proporción *Opuntia*/agua(w/v) 1:1 aplicando US durante el proceso de maceración. y proporción de etanol 1:4, para el proceso de extracción. A continuación, se muestran los resultados cualitativos obtenidos durante la fase 3. (Tabla 15).

Comparativa y selección de métodos de extracción de mucílago de *Opuntia ficus-indica* para su uso como recubrimiento comestible

Tabla 15. Resultados cualitativos obtenidos durante la fase 3

Método	Diferencias cualitativas obtenidas durante la aplicación de los métodos de extracción
<p><b>Nº 1 modificado.</b></p> <p>Proporción de <i>Opuntia</i>/agua (w/v) 1:1 y extracto /etanol (v/v) 1:2 sin US</p> <p>Proporción de <i>Opuntia</i>/agua (w/v) 1:1 y extracto/etanol (v/v) 1:2 con US.</p>	<p>A partir de este experimento se utiliza una placa de inducción para reducir el tiempo de hervido del sobrenadante. Se hierve a 100 °C y una potencia de 1000 W. Se consigue reducir el tiempo de hervido del sobrenadante, pasa de 2 - 3 h en placa calefactora, a 40 - 45 minutos por muestra en la placa de inducción, donde se reduce a la mitad del volumen inicial de sobrenadante.</p> <p>Después de realizar la filtración se observa que, con el uso de US, se extrae más cantidad de mucílago, pero no se realiza una buena agregación del mucílago (a), quedando este con una textura más gelatinosa, pero sin llegar a ser extracto acuoso. Aplicando US se obtiene mayor cantidad de mucílago y una coloración más blanquizca (b) de este.</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;">   </div> <p>(a) (b)</p>
<p><b>Nº 1 (Allegra et al., 2016).</b></p> <p>Proporciones de <i>Opuntia</i>/agua (w/v) 1:1,5 y extracto/etanol (v/v) 1:2, sin US</p> <p><b>Nº 1 modificado.</b></p> <p>Proporción de <i>Opuntia</i>/agua (w/v) 1:1 y extracto/etanol (v/v) 1:4 con US</p>	<p>Se hace un experimento comparativo del M1 sin US con proporciones de <i>Opuntia</i>/agua 1:1,5 (método nº1 (Allegra et al., 2016).), y M1 con US y proporciones de <i>Opuntia</i>/agua 1:1.</p> <p>De acuerdo con los resultados del experimento anterior (Nº 1 modificado, Tabla 15), se decide aumentar la proporción de etanol de 1:2 a 1:4, ya que la extracción del mucílago no se hizo completamente.</p> <p>Al parecer el uso de US favorece la liberación de mucílago (c) de la materia vegetal, según los resultados de rendimientos (Figura 20). Además, proporciona una tonalidad más blanquizca (d) al mucílago obtenido.</p> <p>También contribuye a este efecto el aumento en las proporciones de etanol.</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;">   </div> <p>(c) (d)</p> <p>Se realiza una extracción de 72 h / 4 °C, con US. El tiempo de realización del experimento es de 4 días aproximadamente, hasta obtener resultados.</p>

## Conclusiones

Con este trabajo se intentó encontrar un método con el que poder estandarizar la obtención del **mucílago** de la *Opuntia ficus-indica*, con la aplicación de técnicas, como el US y realizando modificaciones durante el proceso, para favorecer la extracción y mejorar el rendimiento, valores SST (°Brix), valores de pH y aspecto visual de **este**. Además, con la aplicación de US durante 15 minutos, con una potencia de 50 % y ciclo de 50 segundos, se mejoró el tiempo de extracción del mucílago y su viscosidad después de la maceración. Sin embargo, no se demostró que alargando los días de extracción con etanol se obtuviese más rendimiento de mucílago.

El método utilizado resulta ser largo de aplicar, inicialmente la duración es de tres días, para conseguir extraer el mucílago por completo. No obstante, es un proceso que se puede poner en práctica para obtener un mucílago puro a partir del propio filocladio fresco, a diferencia de otras técnicas que utilizan harina de filocladios para extraerlo.

Partiendo de este punto se podría continuar realizando pruebas para la utilización de mucílago como recubrimiento comestible, también se podrían hacer modificaciones de los parámetros utilizados con el US, además de hacer estudios para la conservación del mucílago, introduciendo una técnica de secado después de la extracción. El método presentado es una buena forma de obtención, inicial de la materia prima, después se puede optar por establecer una técnica de secado para obtener un producto final mejor presentado y de mayor durabilidad.

## Bibliografía

Lira-Vargas A. A., Corrales-García, J. J., Valle-Guadarrama, S., Peña-Valdivia, C. B., & Trejo-Marquez, M. A. (n.d.). (PDF) *Biopolymeric films based on cactus (Opuntia ficus-indica) mucilage incorporated with gelatin and beeswax*. Retrieved November 9, 2021, from [https://www.researchgate.net/publication/270821866\\_Biopolymeric\\_films\\_based\\_on\\_cactus\\_Opuntia\\_ficus-indica\\_mucilage\\_incorporated\\_with\\_gelatin\\_and\\_beeswax](https://www.researchgate.net/publication/270821866_Biopolymeric_films_based_on_cactus_Opuntia_ficus-indica_mucilage_incorporated_with_gelatin_and_beeswax)

Allegra, A., Inglese, P., Sortino, G., Settanni, L., Todaro, A., & Liguori, G. (2016). *The influence of Opuntia ficus-indica mucilage edible coating on the quality of "Hayward" kiwifruit slices*. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2016.05.011>

Astello-García, M. G., Cervantes, I., Nair, V., del Socorro Santos-Díaz, M., Reyes-Agüero, A., Guéraud, F., Negre-Salvayre, A., Rossignol, M., Cisneros-Zevallos, L., Barba de la Rosa, A. P., Potosi, L., & Luis Potosi, S. (n.d.). *Chemical composition and phenolic compounds profile of cladodes from Opuntia spp. cultivars with different domestication gradient*. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2015.04.016>

Astello-García, M. G., Cervantes, I., Nair, V., del Socorro Santos-Díaz, M., Reyes-Agüero, A., Guéraud, F., Negre-Salvayre, A., Rossignol, M., Cisneros-Zevallos, L., Barba de la Rosa, A. P., Potosi, L., & Luis Potosi, S. (2015). *Chemical composition and phenolic compounds profile of cladodes from Opuntia spp. cultivars with different domestication gradient*. *Food Composition and Analysis*. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2015.04.016>

Bayar, N., Bouallegue, T., Achour, M., Kriaa, M., Bougatef, A., & Kammoun, R. (2017a). *Ultrasonic extraction of pectin from Opuntia ficus indica cladodes after mucilage removal: Optimization of experimental conditions and evaluation of chemical and functional properties*. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.05.029>

Bayar, N., Bouallegue, T., Achour, M., Kriaa, M., Bougatef, A., & Kammoun, R. (2017b). *Ultrasonic extraction of pectin from Opuntia ficus indica cladodes after mucilage removal: Optimization of experimental conditions and evaluation of chemical and functional properties*. *Food Chemistry*, 235, 275–282. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2017.05.029>

- Betancourt-Domínguez, M. A., Hernández-Pérez, T., García-Saucedo, P., Cruz-Hernández, A., & Paredes-López, O. (2006). Physico-Chemical Changes In Cladodes (Nopalitos) From Cultivated And Wild Cacti (*Opuntia* spp.). *Plant Foods for Human Nutrition* 2006 61:3, 61(3), 115–119. <https://doi.org/10.1007/S11130-006-0008-6>
- Adetunji, C. O., Fawole, O. B., Arowora, K. A., Abiodun, A. A., Adetunji, J. B., M. O. O. (2012). *Development and Evaluation of Coatings from Cactus opuntia in Prolonging the Shelf-life of Mangoes (Mangifera indica) Stored under Evaporative Coolant System (ECS)*. [https://www.researchgate.net/publication/248392110\\_Development\\_and\\_Evaluation\\_of\\_Coatings\\_from\\_Cactus\\_opuntia\\_in\\_Prolonging\\_the\\_Shelf-life\\_of\\_Mangoes\\_Mangifera\\_indica\\_Stored\\_under\\_Evaporative\\_Coolant\\_System\\_ECS](https://www.researchgate.net/publication/248392110_Development_and_Evaluation_of_Coatings_from_Cactus_opuntia_in_Prolonging_the_Shelf-life_of_Mangoes_Mangifera_indica_Stored_under_Evaporative_Coolant_System_ECS)
- Campos, C. A., Gerschenson, L. N., & Flores, S. K. (2011). Development of Edible Films and Coatings with Antimicrobial Activity. *Food and Bioprocess Technology*, 4(6), 849–875. <https://doi.org/10.1007/S11947-010-0434-1>
- Cárdenas, A., Higuera-Ciapara, I., & Goycoolea, F. M. (1998). Rheology and Aggregation of Cactus (*Opuntia ficus-indica*) Mucilage in Solution. *Journal of the Professional Association of Cactus Development*, 152–159. [https://www.researchgate.net/publication/242096813\\_Rheology\\_and\\_Aggregation\\_of\\_Cactus\\_Opuntia\\_ficus-indica\\_Mucilage\\_in\\_Solution](https://www.researchgate.net/publication/242096813_Rheology_and_Aggregation_of_Cactus_Opuntia_ficus-indica_Mucilage_in_Solution)
- Carmona, J. C., Robert, P., Vergara, C., & Sáenz, C. (2021). Microparticles of yellow-orange cactus pear pulp (*Opuntia ficus-indica*) with cladode mucilage and maltodextrin as a food coloring in yogurt. *LWT*, 138, 110672. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2020.110672>
- Carpintero-Tepole, V., Córdova-Aguilar, M. S., Vázquez-León, L. A., Guzmán-Huerta, C., Blancas-Cabrera, A., & Ascanio, G. (2021). Ultrafiltration of *Opuntia ficus-indica* mucilage obtained by solvent-free mechanical extraction. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(4), e15293. <https://doi.org/10.1111/JFPP.15293>
- Chemat, F., Muhammed, Z.-E.-H., & Khan, K. (2010). *Applications of ultrasound in food technology: Processing, preservation and extraction*. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2010.11.023>
- Contreras-Padilla, M., Rodríguez-García, M. E., Gutiérrez-Cortez, E., Valderrama-Bravo, M. del C.,

- Rojas-Molina, J. I., & Rivera-Muñoz, E. M. (2016). Physicochemical and rheological characterization of *Opuntia ficus* mucilage at three different maturity stages of cladode. *European Polymer Journal*, 78, 226–234. <https://doi.org/10.1016/J.EURPOLYMJ.2016.03.024>
- Contreras Lozano, K. P., Aguas Mendoza, Y., Salcedo Mendoza, G., Olivero Verbel, R., & Mendoza Ortega, G. P. (2015). *El Nopal (Opuntia ficus-indica) como coagulante natural complementario en la clarificación de agua*. 10.
- Corona-Jiménez, E., Martínez-Navarrete, N., Ruiz-Espinosa, H., & Carranza-Concha, J. (2016). *Extracción asistida por ultrasoni... preview & related info | Mendeley*. 2016. Retrieved June 6, 2022, from [https://www.mendeley.com/catalogue/a644dbd8-1007-34a4-8d25-981945e1d7ce/?utm\\_source=desktop&utm\\_medium=1.19.8&utm\\_campaign=open\\_catalog&userDocumentId=%7B244b5b22-0b3b-3eed-b364-eebf1f5aeee2%7D](https://www.mendeley.com/catalogue/a644dbd8-1007-34a4-8d25-981945e1d7ce/?utm_source=desktop&utm_medium=1.19.8&utm_campaign=open_catalog&userDocumentId=%7B244b5b22-0b3b-3eed-b364-eebf1f5aeee2%7D)
- Cortázar, V. G. de, & Nobel, P. S. (1992). Biomass and Fruit Production for the Prickly Pear Cactus, *Opuntia ficus-indica*. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 117(4), 558–562. <https://doi.org/10.21273/JASHS.117.4.558>
- Del-Valle, V., Hernández-Muñoz, P., Guarda, A., & Galotto, M. J. (2005). *Development of a cactus-mucilage edible coating (Opuntia ficus indica) and its application to extend strawberry (Fragaria ananassa) shelf-life*. 751–756. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.07.002>
- Delgado, J. O. (2012). Aplicación del Ultrasonido en la Industria de los Alimentos. *Publicaciones e Investigación*, 6, 141. <https://doi.org/10.22490/25394088.1098>
- Ercan, S. Ş., & Soysal, Ç. (2011). Effect of ultrasound and temperature on tomato peroxidase. *Ultrasonics Sonochemistry*, 18(2), 689–695. <https://doi.org/10.1016/J.ULTSONCH.2010.09.014>
- Felkai-Haddache, L., Dahmoune, F., Remini, H., Lefsih, K., Mouni, L., & Madani, K. (2016). Microwave optimization of mucilage extraction from *Opuntia ficus indica* Cladodes. *International Journal of Biological Macromolecules*, 84, 24–30. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2015.11.090>
- Fernández Valdés, D., Bautista Baños, S., Fernández Valdés, D., Ocampo Ramírez, A., García Pereira, A., & Falcón Rodríguez, A. (2015). Películas y recubrimientos comestibles: una alternativa

favorable en la conservación poscosecha de frutas y hortalizas. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 24(3), 52–57. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2071-00542015000300008&lng=es&nrm=iso&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-00542015000300008&lng=es&nrm=iso&tlng=es)

Goldstein, G., Andrade, J., & Nobel, P. (1991). Differences in Water Relations Parameters for the Chlorenchyma and the Parenchyma of *Opuntia ficus-indica* Under Wet Versus Dry Conditions. *Functional Plant Biology*, 18(2), 95–107. <https://doi.org/10.1071/PP9910095>

Goycoolea, F. M., & Cardenas, A. (2003). *Pectins from Opuntia spp.: A short review Selected phytochemicals, Possible nanoencapsulation and their antiquorum sensing ability against E. coli Top 10 biosensor View project SYBR Gold Fluorescence Quenching is a Sensitive Probe of Chitosan-microRNA Int.* Retrieved June 8, 2022, from <https://www.researchgate.net/publication/228769966>

Guevara-Figueroa, T., Jiménez-Islas, H., Reyes-Escogido, M. L., Mortensen, A. G., Laursen, B. B., Lin, L. W., De León-Rodríguez, A., Fomsgaard, I. S., & Barba de la Rosa, A. P. (2010). Proximate composition, phenolic acids, and flavonoids characterization of commercial and wild nopal (*Opuntia* spp.). *Journal of Food Composition and Analysis*, 23(6), 525–532. <https://doi.org/10.1016/J.JFCA.2009.12.003>

Kiesling, R. (1999). Origen , Domesticación y Distribución de *Opuntia ficus-indica*. *J. Profess. Assoc. Cact. Develop.*, 22(1642), 4747–4748.

Liguori, G., Gaglio, R., Settanni, L., Inglese, P., D’anna, F., & Miceli, A. (2021). *Effect of Opuntia ficus-indica Mucilage Edible Coating in Combination with Ascorbic Acid, on Strawberry Fruit Quality during Cold Storage.* <https://doi.org/10.1155/2021/9976052>

Loyo Godoy, M. del C. (2018). *Evaluación de los efectos del uso del mucílago de nopal opuntia ficus-indica y la temperatura en la clarificación de jugo de caña sobre el color de la panela* [UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE]. <https://1library.co/document/zpwrxe7y-evaluacion-efectos-mucilago-opuntia-indica-temperatura-clarificacion-panela.html>

Majdoub, H., Roudesli, S., Picton, L., Le Cerf, D., Muller, G., & Grisel, M. (2001). Prickly pear nopals pectin from *Opuntia ficus-indica* physico-chemical study in dilute and semi-dilute solutions. *Carbohydrate Polymers*, 46(1), 69–79. [https://doi.org/10.1016/S0144-8617\(00\)00284-8](https://doi.org/10.1016/S0144-8617(00)00284-8)



- Majid, I., Nayik, G. A., & Nanda, V. (2015). Ultrasonication and food technology: A review. *Cogent Food and Agriculture*, 1(1). <https://doi.org/10.1080/23311932.2015.1071022>
- Maki-Díaz, G., Peña-Valdivia, C. B., García-Nava, R., Lourdes Arévalo-Galarza, M., Calderón-Zavala, G., & Anaya-Rosales, S. (n.d.). *CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS DE NOPAL VERDURA (Opuntia ficus-indica) PARA EXPORTACIÓN Y CONSUMO NACIONAL PHYSICAL AND CHEMICAL CHARACTERISTICS OF CACTUS STEMS (Opuntia ficus-indica) FOR EXPORTATION AND DOMESTIC MARKETS.*
- Medina-Torres, L., Brito-De La Fuente, E., Torrestiana-Sanchez, B., & Katthain, R. (2000). Rheological properties of the mucilage gum (*Opuntia ficus indica*). *Food Hydrocolloids*, 14(5), 417–424. [https://doi.org/10.1016/S0268-005X\(00\)00015-1](https://doi.org/10.1016/S0268-005X(00)00015-1)
- Messina, C. M., Arena, R., Morghese, M., Santulli, A., Liguori, G., & Inglese, P. (2021). Seasonal characterization of nutritional and antioxidant properties of *Opuntia ficus-indica* [(L.) Mill.] mucilage. *Food Hydrocolloids*, 111, 106398. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106398>
- Oliveira, G. D. A. R., De Oliveira, A. E., Da Conceição, E. C., & Leles, M. I. G. (2016). Multiresponse optimization of an extraction procedure of carnosol and rosmarinic and carnosic acids from rosemary. *Food Chemistry*, 211, 465–473. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2016.05.042>
- Olivero Verbel, R. E., Mercado Martínez, I. D., & Montes Gazabón, L. E. (2013). *Remoción de la turbidez del agua del río Magdalena usando el mucílago del nopal Opuntia ficus-indica.* 8(1).
- Otálora, M. C., Wilches-Torres, A., & Gómez Castaño, J. A. (2021). Extraction and physicochemical characterization of dried powder mucilage from *Opuntia ficus-indica* cladodes and aloe vera leaves: A comparative study. *Polymers*, 13(11). <https://doi.org/10.3390/POLYM13111689>
- Puma Condori, Y. (2020). *EVALUACIÓN DEL PROCESO DE COAGULACIÓN Y FLOCULACIÓN CON MUCILAGO DE OPUNTIA FICUS INDICA COMO ADYUVANTE DEL FeCl3 EN EFLUENTES DE SERVICIOS DE COMIDA.* UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA.
- Reyes-Agüero, A., Antonio, J., & Rogelio, J. (2005). *SYSTEMATIC NOTES AND A DETAILED DESCRIPTION OF Opuntia ficus-indica (L.) MILL. (CACTACEAE).* 39, 395–408.

<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30239404>

Reyes-Buendía, C., Corrales-García, J. J. E., Peña-Valdivia, C. B., Montes Hernández, A., & Ybarra-Moncada, M. C. (2020). *Sopa de elote (Zea mays) tipo crema con mucílago de nopal (Opuntia spp.) como espesante, sus características físicas y aceptación sensorial*. 23, 1–14. <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2020.0.257>

Reyes-Ocampo, I., Córdova-Aguilar, | M S, Guzmán, | G, Blancas-Cabrera, | A, & Ascanio, | G. (2018). *Solvent-free mechanical extraction of Opuntia ficus-indica mucilage*. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12954>

Rodríguez-González, S., Martínez-Flores, H. E., Órnelas-Nuñez, J. L., & Garnica-Romo, M. G. (2014). *OPTIMIZACIÓN DE LA EXTRACCIÓN DEL MUCÍLAGO DE NOPAL (Opuntia ficus-indica)*.

Rodríguez, S. (2011). *Optimización De La Extracción Del Mucílago De Nopal*. Rodríguez.

Sáenz, C., & Montoya, L. C. (1999). Nopalitos: nueva hortaliza para Chile . *El Campesino*, Vol. 130, N° 6, 4–7. [https://scholar.google.com.mx/scholar?hl=es&as\\_sdt=0,5&cluster=3945264793973813705](https://scholar.google.com.mx/scholar?hl=es&as_sdt=0,5&cluster=3945264793973813705)

Sáenz, Carmen, Sepúlveda, E., & Matsuhira, B. (2004). *Opuntia spp mucilage's: a functional component with industrial perspectives*. *Journal of Arid Environments*, 57(3), 275–290. [https://doi.org/10.1016/S0140-1963\(03\)00106-X](https://doi.org/10.1016/S0140-1963(03)00106-X)

Sáenz, H., & Sepulveda, R. (1993). *Alternatives of industrialization of prickly pear (Opuntia ficus indica)*. <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=CL19940113244>

Sanz Elorza M., Dana Sánchez E.D., & Sobrino Vesperinas E. (2004). *Atlas de las Plantas Alóctonas Invasoras en España. Dirección General para la Biodiversidad*. (p. 384). [https://www.animalrecord.net/Atlas\\_Plantas\\_Aloctonas\\_Espana.pdf](https://www.animalrecord.net/Atlas_Plantas_Aloctonas_Espana.pdf)

Sepúlveda, E., Saézn, C., Aliaga, E., & Aceituno, C. (2007). *Extraction and characterization of mucilage in Opuntia spp*. *Journal of Arid Environments*, 68, 534–545. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2006.08.001>

Sepúlveda, E., Sáenz, C., Aliaga, E., & Aceituno, C. (2007). *Extraction and characterization of*

mucilage in *Opuntia* spp. *Journal of Arid Environments*, 68(4), 534–545.  
<https://doi.org/10.1016/J.JARIDENV.2006.08.001>

Rojas T., Fuentes Campos M. E., Contreras-López E., Gómeza S., A. M. M.-J. (2019). Extracción asistida por ultrasonido de compuestos fenólicos de la cáscara de *Sanky* (*Corryocactus brevistylus*). 2019. Retrieved June 6, 2022, from [http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S1810-634X2019000200012&script=sci\\_arttext&tlng=pt](http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S1810-634X2019000200012&script=sci_arttext&tlng=pt)

Thirugnanasambandham, K., Sivakumar, V., & Maran, J. P. (2015). Microwave-assisted extraction of polysaccharides from mulberry leaves. *International Journal of Biological Macromolecules*, 72, 1–5. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2014.07.031>

Tiwari, B. K., & Mason, T. J. (2012). Ultrasound Processing of Fluid Foods. *Novel Thermal And Non-Thermal Technologies For Fluid Foods*, 135–165. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-381470-8.00006-2>

Trachtenberg, S., & Mayer, A. M. (1981). Composition and properties of *Opuntia ficus-indica* mucilage. *Phytochemistry*, 20(12), 2665–2668. [https://doi.org/10.1016/0031-9422\(81\)85263-6](https://doi.org/10.1016/0031-9422(81)85263-6)

Villanueva Puma, S. J. (2020). *EVALUACIÓN DEL MUCILAGO DEL NOPAL (Opuntia ficus indica) COMO AGENTE ESTABILIZANTE EN LA ELABORACIÓN DE NECTAR DE AGUAYMANTO (Physalis peruviana)*.

Zegbe, J. A., Mena-Covarrubias, J., & Domínguez-Canales, V. S. I. (2015). Cactus mucilage as a coating film to enhance shelf life of unprocessed guavas (*Psidium guajava* L.). *Acta Horticulturae*, 1067, 423–427. <https://doi.org/10.17660/ACTAHORTIC.2015.1067.58>

Zheng, X., Yin, F., Liu, C., & Xu, X. (2011). Effect of Process Parameters of Microwave Assisted Extraction (MAE) on Polysaccharides Yield from Pumpkin. *Journal of Northeast Agricultural University (English Edition)*, 18(2), 79–86. [https://doi.org/10.1016/S1006-8104\(12\)60014-2](https://doi.org/10.1016/S1006-8104(12)60014-2)

Živković, J., Janković, T., Menković, N., & Šavikin, K. (2019). Optimization of ultrasound-assisted extraction of isogentisin, gentiopicroside and total polyphenols from gentian root using

response-surface methodology. *Industrial Crops and Products*, 139, 111567.  
<https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2019.111567>

## Anexos

Tabla A1. Serie de datos experimentales. Datos de estadística descriptiva de fase 3.1

Variable	Fase	Proporción de agua	N	Media	Error estándar de la media	Desviación Estándar	Varianza	Coficiente de variación	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
Rendimiento sin US	Fase 3.1	1:1	3	7,21	2,32	4,02	16,15	55,77	3,85	3,85	6,11	11,66	11,66
Rendimiento con US		1:1	3	5,147	0,575	0,996	0,993	19,36	4,290	4,290	4,910	6,240	6,240
pH sin US		1:1	3	3,9767	0,0536	0,0929	0,0086	2,34	3,8700	3,8700	4,0200	4,0400	4,0400
pH con US		1:1	3	4,1267	0,00667	0,0115	0,00013	0,28	4,1200	4,1200	4,1200	4,1400	4,1400
SST (°Brix) sin US		1:1	3	4,167	0,328	0,569	0,323	13,65	3,700	3,700	4,000	4,800	4,800
SST (°Brix) con US		1:1	3	3,933	0,167	0,289	0,083	7,34	3,600	3,600	4,100	4,100	4,100

Tabla A2. Datos de estadística descriptiva obtenidos de fase 3.2

Variable	Fase	Proporción de agua	N	Media	Error estándar de la media	Desviación Estándar	Varianza	Coficiente de variación	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
Rendimiento sin US	Fase 3.2	1:1,5	4	2,900	0,255	0,510	0,260	17,58	2,470	2,490	2,775	3,435	3,580
Rendimiento con US		1:1	4	4,285	0,811	1,623	2,633	37,87	2,760	2,945	3,935	5,975	6,510
pH sin US		1:1,5	4	4,3600	0,0141	0,0283	0,0008	0,65	4,3200	4,3300	4,3700	4,3800	4,3800
pH con US		1:1	4	4,3600	0,00707	0,0141	0,00020	0,32	4,3400	4,3450	4,3650	4,3700	4,3700
SST (°Brix) sin US		1:1,5	4	3,125	0,165	0,330	0,109	10,57	2,700	2,800	3,150	3,425	3,500

Tabla A2. Datos de estadística descriptiva obtenidos de fase 3.2 (Cont.)

Variable	Fase	Proporción de agua	N	Media	Error estándar de la media	Desviación Estándar	Varianza	Coficiente de variación	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
SST (°Brix) con US		1:1,1	4	3,575	0,269	0,538	0,289	15,04	2,900	3,025	3,650	4,050	4,100

Tabla A3. Tiempos de extracción y rendimientos de las muestras obtenidas de los experimentos

Muestras	Tiempo de extracción (días)	%R	Muestras	Tiempo de extracción (días)	%R
m1.1	2	4,22	m1.12	5	2,55
m1.2	2	2,35	m1.13	6	2,47
m1.3	2	4,97	m1.14	6	3
m1.4	2	6,11	m1.15	7	3,58
m1.7	3	3,85	m1.16	7	4,37
m1.8	3	11,66	m1.17	6	2,76
m1.9	3	6,24	m1.18	6	6,51
m1.10	3	4,29	m1.19	7	3,5
m1.11	3	4,91			