



---

---

**INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE ATLIXCO**

*Organismo Público Descentralizado del Gobierno del Estado de Puebla*

NOMBRE DEL TRABAJO:

**EFFECTO DE LA IMPREGNACIÓN AL VACÍO DE UN  
EXTRACTO DE SEMILLA DE MANGO (*Mangifera indica* L.)  
SOBRE LA CAPACIDAD ANTIOXIDANTE Y  
BIOACCESIBILIDAD *IN VITRO* DE POLIFENOLES EN  
RODAJAS DE JÍCAMA (*Pachyrhizus erosus* L).**

**OPCIÓN I.**

**TESIS PROFESIONAL**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**INGENIERO BIOQUÍMICO**

PRESENTA:

**SAÚL GONZÁLEZ MOYA**

DIRECTOR INTERNO:

**M.T.A GUADALUPE GABRIELA BÁRCENA VICUÑA**

DIRECTOR EXTERNO:

**DR. VICTOR MANUEL ZAMORA GASGA**

ATLIXCO, PUE. MAYO, 2022

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco al **Instituto Tecnológico Superior de Atlixco** por haberme recibido cómo parte de la comunidad estudiantil y el apoyo a mi formación académica y profesional. Las experiencias y conocimientos que adquirí a lo largo de mi estancia en esta institución son indispensables para el porvenir de mi carrera profesional.

De igual manera, agradezco a la **M.T.A. Guadalupe Gabriela Bárcena Vicuña** y a la **Dra. Johana Ramírez Hernández** por ser partícipes de la dirección de este proyecto de tesis, al igual que los conocimientos y muchas experiencias que compartieron conmigo en el desarrollo de mi licenciatura; cada experiencia fue esencial para el rumbo que fue tomando mi carrera académica.

Así mismo, quiero agradecer a la **División de Posgrados del Instituto Tecnológico de Tepic**, por haberme recibido en el Laboratorio Integral de Investigación en Alimentos y permitirme desarrollar este proyecto.

Agradezco de manera especial al **Dr. Víctor Manuel Zamora Gasga**, del Instituto Tecnológico de Tepic, por abrirme las puertas del laboratorio y darme la oportunidad de trabajar en su línea de investigación. La experiencia y conocimiento que me compartió a lo largo de la estancia de investigación fueron claves para culminar esta etapa y continuar a la siguiente.

Por último, agradezco a la **M.C.A. Alba Cecilia Durán Castañeda**, por el apoyo, la paciencia y el tiempo que me brindó al momento de desarrollar este proyecto. Los conocimientos que compartió conmigo en esta estancia fueron muy valiosos para este trabajo y mi formación académica.

## DEDICATORIAS

*Quiero dedicar este trabajo, y agradecer de manera infinita, principalmente a mis padres, Edgar y María del Carmen, por todo el apoyo, amor, paciencia y esfuerzo que me brindaron a lo largo de mi carrera, al igual que en toda mi vida, sin duda que sean mis pilares es lo que me trajo hasta este punto de mi vida. También agradezco a mis hermanos, Diego y Mariel por el amor y estar ahí siempre que llegaba a casa. De igual manera, a mis abuelos, Teresa, Ramiro y Catalina, por el amor y apoyo incondicional que me han dado desde niño. A cada uno de mis familiares que aportaron su granito de arena para mi formación de una u otra manera.*

*A aquellos profesores que fueron parte de mi formación académica, profesional y personal, por todo el apoyo brindado, amistad y experiencias compartidas, En especial a los profesores Sandra, Susana, Fila, Aurea, Juanito, Saúl, Gaby, Johana, Juan Carlos, Candelaria, Óscar y Víctor Manuel.*

*A mis amigos de toda la vida, Javier, Heidi, Andrea y Eduardo por ser parte de mi vida, todo el amor y motivación brindados en esta etapa, al igual que en todos los años de amistad.*

*A Gabriela y Stepanie por el apoyo y haber sido parte de mi vida en esta etapa.*

*También a mis amigos que conocí a lo largo de este camino, en especial a Gustavo Alfredo, Laura, Yazmin, Pablo, Cecilio, Paola, Eva, Jhoanna, Anel y Jennifer, por la gran amistad, amor, apoyo y motivación.*

*A mis amigos nayaritas y compañeros de laboratorio, en especial a Ceci, Carlos, Osiris, David, Francia, Marcos, Alex y Dianita, por recibirme y brindarme su amistad, apoyo y conocimientos.*

*A Suecia, por todo el amor, apoyo, motivación, y por haberse convertido en una compañera incondicional en todos los aspectos de mi vida.*

## ÍNDICE

RESUMEN .....	1
INTRODUCCIÓN .....	2
JUSTIFICACIÓN .....	4
OBJETIVOS .....	5
Objetivo general.....	5
Objetivos específicos.....	5
HIPÓTESIS .....	6
CAPÍTULO 1. JÍCAMA ( <i>Pachyrhizus erosus</i> L.).....	7
1.1 Generalidades de la jícama ( <i>Pachyrhizus erosus</i> L.).....	7
1.2 Taxonomía.....	8
1.3. Producción y distribución de la jícama ( <i>Pachyrhizus erosus</i> L.).....	8
1.4. Composición nutricional de la jícama ( <i>Pachyrhizus erosus</i> L.).....	9
1.5. Compuestos bioactivos en la jícama la jícama ( <i>Pachyrhizus erosus</i> L.).....	10
CAPÍTULO 2. MANGO ( <i>Mangifera indica</i> L.) Y SUBPRODUCTOS.....	12
2.1. Generalidades del mango ( <i>Mangifera indica</i> L.).....	12
2.1 Subproductos de mango ( <i>Mangifera indica</i> L.).....	12
CAPÍTULO 3. IMPREGNACIÓN AL VACÍO.....	16
3.1. Fundamentos de la impregnación al vacío.....	16
3.2. Aplicaciones de la impregnación al vacío.....	18
3.2.1. Aplicación de la IV para la pre-deshidratación de frutas y verduras.....	19
3.2.2. Aplicación de la IV para el pretratamiento antes de la congelación.....	19
3.2.3. Aplicación de la IV para la formulación y desarrollo de alimentos funcionales y nutricionalmente fortificados.....	20
CAPÍTULO 4. MODELOS <i>IN VITRO</i> DE DIGESTIÓN.....	22
4.1. Modelo <i>In vitro</i> para la evaluación de bioaccesibilidad.....	23
4.1.1. Bioaccesibilidad <i>in vitro</i> de compuestos fenólicos.....	24
CAPÍTULO 5. MATERIALES Y MÉTODOS .....	26
5.1. Etapa 1: .....	26
5.1.1. Diseño experimental.....	26
5.1.2. Selección del Material vegetal.....	27
5.1.3 Extracción del polifenoles en la semilla de mango.....	27

5.1.4 Preparación de la materia vegetal e impregnación al vacío .....	27
5.1.5. Extracción y cuantificación de Fenoles Solubles Totales (FST) y Polifenoles Hidrolizables (PH) en tratamientos de jícama impregnada .....	28
5.1.6. Evaluación de la capacidad antioxidante (CAOX) por los métodos ABTS, DPPH y FRAP.....	29
5.1.7. Análisis estadístico.....	30
5.2. Etapa 2: .....	31
5.2.1. Diseño experimental.....	31
5.2.2. Evaluación sensorial. ....	31
5.2.3. Análisis proximal en tratamientos de jícama. ....	32
5.2.4. Extracción y cuantificación de Fenoles Solubles Totales (FST) y Polifenoles Hidrolizables (PH) en tratamientos de jícama.....	36
5.2.5. Evaluación de la capacidad antioxidante (CAOX) por los métodos ABTS, DPPH y FRAP en tratamientos de jícama. ....	36
5.2.6. Digestión gastrointestinal <i>in vitro</i> de los tratamientos de jícama. ....	36
5.2.7. Evaluación de la capacidad antioxidante (CAOX) de las fracciones de la digestión <i>in vitro</i> . ....	37
5.2.8. Análisis estadístico.....	38
CAPÍTULO 6. RESULTADOS Y DISCUSIONES. ....	39
6.1 Optimización del proceso de impregnación al vacío.....	39
6.2 Cuantificación de fenoles solubles totales (FST), polifenoles hidrolizables (PH), ABTS, DPPH y FRAP.....	44
6.3 Evaluación sensorial.....	46
6.4 Caracterización proximal. ....	47
6.5 Análisis de bioaccesibilidad <i>in vitro</i> y potencial habilidad de absorción de polifenoles.....	49
6.6. Capacidad antioxidante durante las etapas de digestión <i>in vitro</i> . ....	55
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES.....	57
CAPÍTULO 8. REFERENCIAS .....	58
ANEXOS .....	65

## Índice de cuadros

<b>Cuadro 1.1</b> Taxonomía de la jícama.....	7
<b>Cuadro 1.2</b> Composición nutricional de 100g de jícama.....	9
<b>Cuadro 2.1</b> Compuestos fenólicos presentes en semilla de mango.....	14
<b>Cuadro 5.1</b> Diseño experimental correspondiente a la etapa 1.....	25
<b>Cuadro 5.2</b> Diseño experimental correspondiente a la etapa 2.....	30
<b>Cuadro 6.1</b> Cuantificación de fenoles solubles totales (FST), polifenoles hidrolizables (PH), ABTS, DPPH, FRAP en tratamientos de impregnación al vacío (diseño experimental) .....	38
<b>Cuadro 6.1.1.</b> Respuestas predichas en el nivel actual de cada factor del modelo..	39
<b>Cuadro 6.2</b> Cuantificación de fenoles solubles totales (FST), polifenoles hidrolizables (PH), ABTS, DPPH, FRAP en los tratamientos de jícama.....	44
<b>Cuadro 6.3</b> Resultados de evaluación sensorial en tratamientos de jícama.....	45
<b>Cuadro 6.4</b> Caracterización proximal de los tratamientos de jícama.....	47
<b>Cuadro 6.5.1</b> Análisis de bioaccesibilidad y habilidad absorción potencial de polifenoles.....	52
<b>Cuadro 6.5.2</b> Capacidad antioxidante durante las etapas de digestión gastrointestinal en muestra de jícama.....	54

## Índice de figuras

<b>Figura 1.1</b> Jícama ( <i>Pachyrhizus erosus</i> L.).....	6
<b>Figura 2.1</b> Residuos agrícolas y subproductos industriales de <i>M. indica</i> L. En el sentido de las agujas del reloj: hojas, tallos, bagazo, semillas y almendras, cáscaras, cortezas.....	12
<b>Figura 3.1.</b> Representación esquemática del sistema de impregnación al vacío...	17
<b>Figura 4.1.</b> Modelo de bioaccesibilidad <i>in vitro</i> .....	13
<b>Figura 6.</b> Gráficos de superficie de repuesta para muestras de jícama impregnadas al vacío con extracto de semilla de mango (3 mg/mL).....	41

## Lista de abreviaturas

°C – Grados Celsius

s – Segundo

min – minuto

h – hora

mBar – Milibar

µm – Micrómetro

mg – Miligramos

mL – Mililitros

mM – Milimolar

M - Molar

mmol - Milimoles

µL - Microlitros

mmHG – Milímetros de mercurio

rpm – Revoluciones por minuto

v – Volumen

p – Peso

nm – nanómetros

EAG – Equivalentes de Ácido Gálico

ET – Equivalente de Trolox

FST – Fenoles Solubles Totales

PH – Polifenoles Hidrolizables

BS – Base seca

BH – Base húmeda

CAOX – Capacidad Antioxidante

TO – Muestra de jícama impregnada con extracto de semilla de mango (tratamiento óptimo)

TA - Muestra de jícama impregnada con agua (tratamiento control)

JI – Muestra de jícama fresca o sin tratamiento (muestra control)

IV – Impregnación al vacío

## RESUMEN

La jícama (*Pachyrhizus erosus* L) es un tubérculo nativo de México, fuente de fibra dietética con escasos compuestos bioactivos (CB). Por otra parte, el mango (*Mangifera indica* L) es un fruto tropical con importante contenido de CB, como polifenoles; sin embargo, gran parte de estos se encuentra en la semilla. En ese sentido, es posible incorporar CB de semilla de mango en jícama, a través de tecnologías de transferencia de masa, como la impregnación al vacío (IV). El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de la IV sobre la capacidad antioxidante (CAOX) y bioaccesibilidad *in vitro* de polifenoles (BivP) impregnados en rodajas de jícama. Se obtuvo un extracto de polifenoles de semilla de mango utilizando ultrasonido, el cual fue impregnado al vacío en rodajas de jícama a una concentración 3 mg/mL. Se optimizó la IV considerando espesor de rodaja (ESP), tiempo de vacío (TV) y tiempo de restauración (TR) como factores. Se optimizaron Fenoles Solubles Totales (FST) y CAOX (DPPH, ABTS y FRAP) mediante superficie de respuesta. En el tratamiento óptimo (TO), un control con agua y testigo sin tratamiento (JI), se determinó FST por Folin Ciocalteu, CAOX, composición proximal, preferencia sensorial y BivP por un modelo de digestión gastrointestinal. Las condiciones óptimas del proceso fueron 1.5 mm de ESP, 15 min en TV y 5 min de TR, con un contenido de FST de 11.76 mg EAG/g. Los datos mostraron un incremento de 425% de FST y capacidad antioxidante DPPH, ABTS y FRAP (20.26, 129.99 y 64.52 mmol ET/g respectivamente) al comparar TO con JI. No se obtuvieron diferencias significativas ( $p > 0.05$ ) en los resultados de la evaluación sensorial. Se modificó la composición proximal en TO respecto a JI, en contenido de humedad (de 85.6 a 88.8%), cenizas (de 0.14 a 0.17%), carbohidratos totales (de 6.9 a 5.16%) y fibra dietética total (de 6.28 a 4.17%). Se cuantificó 61.21% de bioaccesibilidad en TO, aumentando este porcentaje 19.76% respecto a JI. Se concluyó que el tratamiento de IV logró incrementar la bioaccesibilidad, disminuir los polifenoles potenciales para la absorción, modificar la composición proximal y mantener el perfil sensorial de rodajas de jícama.

*Palabras clave: Jícama, semilla de mango, impregnación al vacío, polifenoles, capacidad antioxidante, bioaccesibilidad.*

## INTRODUCCIÓN

La jícama (*Pachyrhizus erosus* L.), *yam bean* o nabo mexicano es un tubérculo perteneciente a la familia de las leguminosas Fabaceae originario de México, siendo Nayarit, Guanajuato y Veracruz los principales productores. Estudios sobre su composición nutricional son escasos, tiene un aporte calórico bajo, al igual que su contenido de proteína, grasas y compuestos bioactivos, como los compuestos fenólicos; sin embargo, su contenido de fibra dietética es destacable, siendo la inulina, su principal componente. Por otra parte, el mango (*Mangifera indica* L.) es un fruto tropical rico en nutrientes y compuestos bioactivos, siendo este uno de los cultivos de mayor importancia en términos de producción, comercialización y consumo. En 2022, México reportó una cosecha total de 1,465 mil toneladas, con lo cual, se coloca en el 6° lugar de países productores a nivel mundial y en el 1° lugar de exportadores. Este fruto es rico en compuestos antioxidantes, sin embargo, la mayor parte de estos compuestos se encuentran en la parte no comestible, es decir, los subproductos del mango como su semilla. La semilla de mango, en particular, ha generado mucho interés para la investigación científica debido a su alto contenido de compuestos bioactivos como carotenoides, vitaminas y compuestos fenólicos, los cuales destacan por sus propiedades antioxidantes. Es posible aprovechar los subproductos del mango, realizando ingredientes funcionales, como el extracto de semilla de mango, el cual puede ser incorporado a través de tecnologías de procesos físicos, como la impregnación al vacío (IV). La IV es una tecnología que utiliza gradientes de presión para incorporar componentes funcionales activos en la matriz estructural de alimentos porosos sin modificar sustancialmente sus propiedades organolépticas; está descrita como un fenómeno de transferencia de masa rápida que se produce cuando las estructuras porosas de una matriz alimentaria se sumergen en una fase líquida. En años recientes, se ha impulsado un cambio de alimentación en la población a través de la implementación de dietas basadas en alimentos con bajo aporte calórico, bajo grado de procesamiento, altos en macro y micronutrientes, y, además que, estos sean funcionales, es decir, contengan compuestos bioactivos, tales como terpenos, fitoesteroles, prebióticos, probióticos y polifenoles, con el fin de obtener un beneficio

a la salud y evitar el mayor consumo posible de fármacos. Los modelos de digestión *in vitro* se basan en la fisiología humana para estudiar la estabilidad de los componentes de los alimentos durante la digestión, el transporte intestinal y el metabolismo. Sin embargo, la cantidad de nutrientes y fitoquímicos presentes en los alimentos no son en su totalidad bioaccesibles. La composición de la matriz de los alimentos, el procesamiento que se aplique a los alimentos, la absorción celular, el metabolismo y el posterior transporte en el sistema circulatorio y la interacción entre los mismos son factores que intervienen en el grado de liberación de los compuestos bioactivos de las matrices de los alimentos. Es por eso que en este trabajo se propone la incorporación de polifenoles de extracto de semilla de mango a través de la IV y la evaluación de la bioaccesibilidad y potencial biodisponibilidad de los CF impregnados durante la simulación de un sistema de digestión gastrointestinal *in vitro* en rodajas de jícama.

## JUSTIFICACIÓN

En la actualidad existe un creciente consumo e investigación de los alimentos funcionales, ya que, estos demuestran un efecto beneficioso en el organismo, más allá del aporte nutricional. En ese sentido, los alimentos funcionales por excelencia son los productos de origen vegetal (frutas, verduras, hortalizas, tubérculos, etc.) debido a su abundante contenido de nutrientes y compuestos bioactivos (CB). Uno de estos productos es la jícama (*Pachyrhizus erosus* L), tubérculo con diversos usos en la gastronomía mexicana, de bajo costo económico y que, además, presenta un bajo aporte calórico y alto contenido de agua y fibra dietética, la cual se ha asociado con distintos beneficios a la salud intestinal humana. Sin embargo, a pesar de todos sus atributos, la jícama carece de otros componentes bioactivos, como los compuestos fenólicos (CF), por ejemplo, mismos que han reportado presentar actividad antioxidante en el organismo. Por otro lado, uno de los frutos tropicales más producidos y consumidos en México es el mango (*Mangifera indica* L.), preferido en el mercado nacional por su sabor, nutrientes y abundante contenido de CB. Durante el procesamiento industrial de este fruto se generan alrededor del 35-60% de subproductos, mismos que no son utilizados con fines comerciales; no obstante, la semilla de mango, al ser considerada uno de estos subproductos, ha generado mucho interés en la comunidad científica, gracias a su alto contenido en polifenoles y otros CB. De esta manera, un extracto de CF proveniente de semilla de mango puede fungir como agente de incorporación de dichos compuestos a una matriz alimentaria porosa, como lo es la jícama; fomentando así, el aprovechamiento de subproductos y el decremento del impacto ambiental negativo, además de dar un valor agregado a la jícama. Para esto, la impregnación al vacío (IV) es un método adecuado de incorporación de compuestos, ya que, esta tecnología utiliza gradientes de presión sobre la matriz estructural para hacer llegar estos componentes al nivel intracelular del tejido del alimento sin modificar sustancialmente sus propiedades organolépticas; además de qué, ha demostrado realizar el proceso de incorporación de manera más rápida y eficiente en matrices vegetales a comparación con otras tecnologías, como la deshidratación osmótica.

## OBJETIVOS

### Objetivo general

- Evaluar el efecto de la impregnación al vacío de un extracto de semilla de mango (*Mangifera indica* L.) sobre la capacidad antioxidante, propiedades sensoriales, composición proximal o nutrimental, contenido de compuestos bioactivos y bioaccesibilidad *in vitro* de polifenoles en rodajas de jícama (*Pachyrhizus erosus* L.).

### Objetivos específicos

- Optimizar el proceso de impregnación al vacío (IV) mediante un modelo de superficie de respuesta manipulando las variables de tiempo de vacío, tiempo de restauración y espesor de muestra, sobre las capacidades antioxidantes en rodajas de jícama.
- Evaluar parámetros sensoriales de olor, color, sabor y textura en muestras de jícama fresca, jícama impregnada con agua (control) y el tratamiento óptimo.
- Analizar la composición proximal de muestras de jícama fresca, jícama impregnada con agua (control) y el tratamiento óptimo.
- Determinar el contenido de fenoles solubles totales (FST) y capacidad antioxidante (CAOX) en muestras de jícama fresca, jícama impregnada con agua (control) y el tratamiento óptimo.
- Cuantificar porcentaje de bioaccesibilidad y potencial absorción de polifenoles en jícama fresca, jícama impregnada con agua (control) y el tratamiento óptimo utilizando un modelo de digestión gastrointestinal *in vitro*.
- Evaluar capacidad antioxidante en las muestras de jícama en las etapas del modelo de digestión gastrointestinal *in vitro*.

## **HIPÓTESIS**

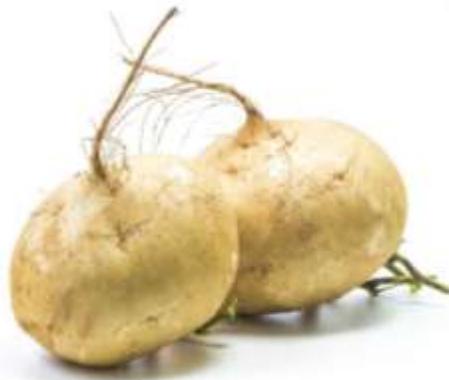
La impregnación al vacío de extracto de semilla de mango (*Mangifera indica* L.) incrementa la capacidad antioxidante, el contenido de compuestos bioactivos y el porcentaje de bioaccesibilidad y potencial biodisponibilidad de polifenoles, sin modificar la composición proximal y la preferencia sensorial en rodajas de jícama (*Pachyrhizus erosus* L).

## **CAPÍTULO 1. JÍCAMA (*Pachyrhizus erosus* L).**

### **1.1 Generalidades de la jícama (*Pachyrhizus erosus* L).**

La jícama, o nabo mexicano, es una planta leguminosa que forma parte de la familia de las *Fabaceae*, o *Leguminosae*, originaria de Centroamérica y México. Sus raíces tuberosas, las cuales son comestibles, son la razón principal por la que ésta es cultivada (Ver Figura 1). La palabra jícama proviene del náhuatl *xicamatl*, que significa “raíz de agua” (SADR, 2019).

Este tubérculo puede llegar a medir hasta 30 centímetros de diámetro. Además de ser un alimento con alto contenido de nutrientes y agua, provee de sustancias nitrogenadas que enriquecen al suelo donde crecen, por presentar bacterias nitrificantes que viven en simbiosis con la raíz (Castro-Ramirez, 2010).



**Figura 1.1** Jícama (*Pachyrhizus erosus* L.)

El exterior de la jícama presenta tonalidades amarillas y cafés, mientras que el interior es de color blanquizco, asemejando una textura cremosa; sin embargo, esta es más bien parecida a la de la papa, una textura quebradiza (Castañeda-Garza, 2000). Cuenta también con un sabor dulce y almidonado, el cual proviene de oligofructosa inulina (carbohidrato que a través del proceso de cocción se transforma en fructosa), y que, además, no se logra metabolizar por el ser humano, resultando ideal para ser consumida por personas diabéticas (Castro-Ramirez, 2010).

## 1.2 Taxonomía.

La jícama es una planta leguminosa perteneciente a la familia Fabaceae, cultivada especialmente por sus raíces tuberosas, las cuales son comestibles (SADR, 2019). Su información taxonómica puede encontrarse en el Cuadro 1.

**Cuadro 1.1** Taxonomía de la jícama.

<b>Categoría</b>	<b>Descripción</b>
Reino:	<i>Plantae</i>
División	<i>Fanerógama Magnoliophyta</i>
Clase:	<i>Magnoliopsida</i>
Subclase:	<i>Rosidae</i>
Orden:	<i>Fabales</i>
Familia:	<i>Fabaceae</i>
Subfamilia:	<i>Faboideae</i>
Género:	<i>Pachyrhizus</i>
Especie:	<i>Pachyrhizus erosus (L.) Urb. 1905</i>

Fuente: (Sorensen, 1996)

## 1.3. Producción y distribución de la jícama (*Pachyrhizus erosus* L).

La siembra, producción y distribución de leguminosas como la jícama, reciben alta prioridad para mejorar la agricultura en países subdesarrollados. Su alto potencial económico como un cultivo extensivo para los países tropicales, y su probada capacidad de sostenibilidad, sirven para justificar una mayor atención a su distribución y mejoramiento. La planta de jícama es fácil de cultivar, con un crecimiento ciclo de aproximadamente 6 a 8 meses (desde la siembra hasta la cosecha de las raíces tuberosas). El rendimiento de raíces tuberosas se ha calculado en 5,0 kg/m<sup>2</sup> (Sorensen, 1996).

A nivel mundial, este tubérculo ha sido producido y consumido en Asia, Suramérica, Centroamérica, El Caribe y Australia; siendo México el mayor productor comercial, cubriendo, de igual manera, la demanda de Estados Unidos de América. También

se ha reportado producción de esta especie en algunas partes de Centroamérica, sin embargo, por la baja escala de esta, es difícil tener una cuantificación precisa. En Estados Unidos se produce jícama en Hawái y en algunas partes de California (Castro-Ramirez, 2010).

En México, según el cierre agrícola de 2018 del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), la producción de jícama fue de 205,531 toneladas, obtenidas en una superficie cosechada de 6,799 hectáreas; siendo Nayarit, Guanajuato y Veracruz los principales estados productores de esta leguminosa, ocupando el 67% del volumen total nacional entre estas tres entidades (SIAP, 2018).

En el estado de Nayarit se cosecha una superficie promedio de 813 hectáreas con un rendimiento aproximado de 30 toneladas por hectárea, contribuyendo con alrededor del 30% a la producción nacional. El consumo de jícama en esta entidad se puede llevar a cabo todo el año, pues se cosecha en dos temporadas, primavera-verano y otoño-invierno en los municipios de Tepic, Santa María del Oro, Acajoneta, Tecuala, Rosamorada, y Tuxpan que es el principal productor, ya que aprovecha las vertientes del río San Pedro (SADR, 2015). En la parte centro y sur del país, Morelos reporta una producción de este cultivo de más de 26,000 toneladas anualmente, con uno de los mejores rendimientos del país: 29.37 toneladas por hectárea (SADR, 2019). En este mismo año, Puebla reporta una producción total de 7,410 toneladas (SIAP, 2019).

#### **1.4. Composición nutricional de la jícama (*Pachyrhizus erosus* L).**

En la actualidad existe escasa información acerca de la composición nutricional de la jícama, sin embargo, la Food Data Central de la USDA, (United States Department of Agriculture), reportó en el año 2019, el aporte nutrimental de 100 g de esta leguminosa. (Cuadro 1.2). La jícama fresca está constituida principalmente por agua y carbohidratos. De igual manera se caracteriza por su bajo aporte calórico, proporcionando 38 kcal por cada 100 gramos (USDA, 2019). Así mismo, se ha reportado que la jícama está compuesta por abundante fibra soluble como la oligofructosa y la inulina, la cual, es un carbohidrato formado a partir de

enlaces  $\beta(1,2)$ -, mismos que son resistentes a las enzimas digestivas como la  $\alpha$ -glucosidasa y la  $\alpha$ -amilasa. Esta característica hace que la inulina comparta algunos aspectos fisiológicos con la fibra dietética soluble; la cual es capaz de retrasar el acceso de la glucosa al epitelio del intestino delgado, reduciendo la absorción de este compuesto al resistir los efectos convectivos de las contracciones intestinales (Espinosa-Andrews y cols., 2016).

**Cuadro 1.2** Composición nutricional de 100g de jícama.

<b>Componente</b>	<b>Valor nutricional (BH)<sup>1</sup></b>
Energía (kcal)	38
Carbohidratos (g)	8.82
Proteína (g)	0.72
Grasas totales (g)	0.19
Colesterol (mg)	0
Fibra dietética (g)	4.9

Fuente: (USDA, 2019)

<sup>1</sup>BH, base húmeda

### **1.5. Compuestos bioactivos en la jícama la jícama (*Pachyrhizus erosus* L).**

Los compuestos bioactivos son sustancias que se encuentran en la naturaleza, que, dependiendo de la estructura química pueden presentar características bioactivas de interés para el hombre. En los últimos años la población ha aumentado su interés por integrarlos a su dieta, debido a que, diversas investigaciones han reportado que estos compuestos tienen diferentes efectos benéficos para la salud (Espinosa-Andrews y cols., 2016).

Se han reportado alrededor de 21 compuestos orgánicos volátiles presentes en las hojas de *P. erosus* a través de cromatografía de gases junto con espectroscopia de masas. Esta especie de jícama tiene compuestos más volátiles en comparación con otras especies cercanas, como *P. ferrugineus*, por ejemplo. *P. erosus* contiene principalmente aldehídos, cetonas y alcoholes entre sus compuestos orgánicos

volátiles. De igual manera, se han identificado varios compuestos bioactivos importantes de las hojas de *P. erosus*, incluyendo ácido gálico, ácido p-hidroxibenzoico, ácido p-cumárico, ácido salicílico, L-fenilalanina, y malonil daidzina (Jaiswal, Chauhan, y Lee, 2021).

Los fenoles y polifenoles son compuestos orgánicos cuyas estructuras moleculares contienen al menos un grupo fenol unido a un grupo hidroxilo. Estos compuestos tienen su origen en el mundo vegetal, son unos de los principales metabolitos secundarios de las plantas y su presencia en el reino animal se debe a la ingestión de éstas. También se les ha asociado principalmente con el término “antioxidantes” gracias a esta característica que presentan (Espinosa-Andrews y cols., 2016). En jícama fresca se ha reportado un contenido fenólico total de 0.373 mg equivalentes de ácido gálico (EAG)/g en base húmeda (Aquino-Bolaños y Mercado-Silva, 2004). De igual manera, se reporta que los polifenoles hallados en *P. erosus* pueden disminuir la producción de radical hidroxilo en la reacción de Fenton a través de la quelación de iones metálicos como  $Fe^{2+}$ , que es el sustrato requerido en la reacción. Aunque la actividad antioxidante de *P. erosus* no es una de sus principales bondades, se pueden destacar diversas propiedades biológicas de esta, como su actividad antidiabética, anticancerígena, inmunomoduladora y prevención de úlceras gástricas, asociadas principalmente a su alto contenido de fibra dietética (FD) (Jaiswal y cols., 2021).

Como se mencionó anteriormente, es importante destacar el abundante contenido de FD en la jícama al consumirse fresca. Al ser esta una legumbre, su contenido de FD es semejante al reportado en frijol, lentejas y papas (4.3, 5.4, 2.9 g/100 g, respectivamente). Se ha demostrado que el consumo de FD tiene una relación inversa con el desarrollo de ciertas enfermedades no transmisibles como la obesidad y la diabetes (Li, Andrews, y Pehrsson, 2002). Además, la FD está constituida por un grupo heterogéneo de sustancias de origen vegetal que son resistentes a la digestión y absorción en el intestino delgado, pero que sufren una digestión parcial o total en el colon. La fibra insoluble ayuda a mantener un tránsito intestinal normal y la soluble tiene efectos beneficiosos sobre la microbiota del colon,

donde es fermentada generando ácidos grasos de cadena corta (Valenzuela B y Maiz G, 2006). Y es por esta característica, y todas las propiedades anteriormente citadas, que la jícama es una matriz alimenticia ideal para la incorporación de compuestos bioactivos a través de tecnologías de transferencia de masa, brindando una potencial actividad antioxidante y valor agregado al producto.

## **CAPÍTULO 2. MANGO (*Mangifera indica* L.) Y SUBPRODUCTOS.**

### **2.1. Generalidades del mango (*Mangifera indica* L.)**

El mango (*Mangifera indica* L.), perteneciente a la familia de las *Anacardiaceae*, además de contar con un alto contenido de nutrientes y compuestos antioxidantes, se ha considerado como el cultivo frutal tropical más importante en términos de producción y comercio a nivel mundial. Los mangos son nativos del sur y el sureste de Asia, y, en la actualidad, los países con mayor producción de este fruto son India, China, Tailandia, Indonesia, Pakistán, México, Brasil, Bangladesh, Nigeria y Filipinas (Kumar y cols., 2021). En México, el mango se cosecha en 23 estados, siendo Sinaloa, Guerrero, Nayarit y Chiapas las principales entidades productoras. A nivel nacional se cosecha un total de 1,465 mil toneladas, con lo cual, México se coloca en el 6° lugar de países productores a nivel mundial y en el 1° lugar de exportadores (SADR, 2020). Este fruto, con su alto contenido de ácido ascórbico,  $\beta$ -caroteno y polifenoles con alta capacidad antioxidante y antimicrobiana, puede prevenir algunas enfermedades degenerativas en humanos (Siller-Sánchez, Alvarez-Pérez, Aguilar, y Rojas, 2013). La pulpa del mango presenta una amplia gama de CF con propiedades funcionales, sin embargo, el mayor contenido de CF se encuentra en la fracción no comestible, la cual comprende a la cáscara y semilla (Gomez-Caravaca, Lopez-Cobo, Verardo, Segura-Carretero, y Fernandez-Gutierrez, 2016).

### **2.1 Subproductos de mango (*Mangifera indica* L.)**

El procesamiento del exceso de frutas da como resultado productos como mango en almíbar, jugo, néctar, concentrado de pulpa, mango liofilizado, barras de mango, cereales, mermeladas, jaleas, entre otros; sin embargo, además de los productos

generados, existe la posibilidad de utilizar subproductos debido a la gran cantidad de compuestos bioactivos en estos residuos (Okino-Delgado y Fleuri, 2015). Los desechos agrícolas y los subproductos industriales del mango (Ver Figura 2.1) se manejan con recuperación (por ejemplo, fabricación de productos), reciclaje (por ejemplo, como fuente de nutrientes para piensos, biocombustibles o compostaje) o métodos de eliminación (por ejemplo, incineración y vertedero). Este último representa, no solo un problema ambiental, sino también un impacto económico para la agroindustria del mango. Desde una perspectiva tecnológica - alimentaria, los desechos de mango y los subproductos son excelentes fuentes de nutrientes esenciales y fitoquímicos con propiedades funcionales y nutracéuticos (Wall-Medrano y cols., 2020).



**Figura 2.1** Residuos agrícolas y subproductos industriales de *M. indica* L. En el sentido de las agujas del reloj: hojas, tallos, bagazo, semillas y almendras, cáscaras, cortezas.

Los principales subproductos del procesamiento del mango son cáscaras y semillas. Dependiendo de los cultivos y productos elaborados, sus subproductos industriales, a saber, cáscaras y semillas, representan un 35-60% del peso total de la fruta. Por esto, es que en las últimas décadas se han realizado distintas investigaciones

acerca de estos subproductos, para entender de que están constituidos y saber la manera de aprovecharlos. Se ha reportado que los subproductos del mango, como la cáscara y las semillas, contienen altos niveles de diversas sustancias que mejoran la salud, como compuestos fenólicos, carotenoides, vitamina C y fibra dietética, incluso en niveles más elevados que la parte comestible, que es la pulpa de este fruto (Jahurul y cols., 2015).

### **2.2.1 Compuestos bioactivos de la semilla de mango (*Mangifera indica* L.)**

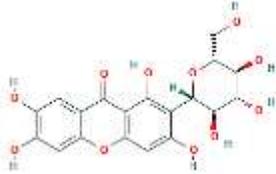
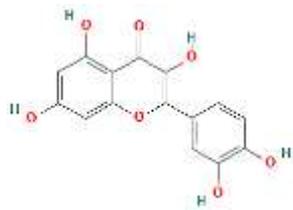
Las semillas de mango se utilizan tradicionalmente contra patógenos gástricos, especialmente en tratamiento infantil, o como cura antidiarreica. Se ha reportado una importante concentración de compuestos bioactivos en subproductos agroindustriales del mango, en particular mangiferina, una xantona glucósidica, la cual presenta actividad antioxidante. Aunque aún falta explorar más el potencial nutricional y farmacéutico de los subproductos del mango; se sabe que, tanto la cáscara, la semilla y la pulpa no utilizada de mango son materias primas favorables para la obtención de extractos ricos en compuestos fenólicos con propiedades antioxidantes, además de que, con su aprovechamiento se podría reducir los problemas ambientales causados por estos residuos (Sumaya-Martínez y cols., 2019).

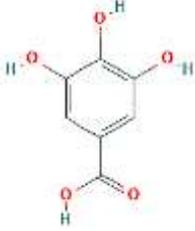
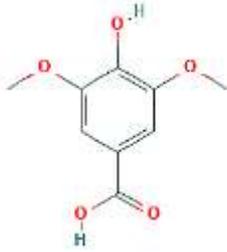
La semilla de mango, en particular, ha generado mucho interés para la investigación científica debido a su alto contenido de compuestos bioactivos como carotenoides, vitaminas y CF. Dichos compuestos, como se ha mencionado anteriormente, destacan por sus propiedades antioxidantes, actuando como quelantes (sobre todo los fenoles no flavonoides) formando complejos con metales di o trivalentes, especialmente con el hierro y el aluminio, lo que puede tener también implicaciones nutricionales. Estas propiedades antioxidantes son el motivo de las potenciales implicaciones en la salud humana; como son la prevención del cáncer, de enfermedades cardiovasculares o incluso de enfermedades neurodegenerativas como el Alzheimer (Gimeno-Creus, 2004).

Las investigaciones de Alanon, Pimentel-Moral, Arraez-Roman, y Segura-Carretero (2021) señalan que el contenido fenólico total (CFT) en la semilla de mango es de

80.5 mg equivalentes de ácido gálico (EAG)/g, que, en comparación con el CFT de la pulpa de mango (4.2 EAG/g), es 19 veces más alto. Se ha reportado que los compuestos fenólicos presentes en la semilla del mango (Cuadro 2.1) son la mangiferina, catequina, quercetina, ácido gálico y elágico; señalando, de igual manera, las propiedades biológicas de estos compuestos descritos por otros autores, y destacando una concentración total promedio de ácido gálico de 21.51 mg/100g (Alanon y cols., 2021). Este hallazgo confirmó el uso potencial de la semilla de mango como una fuente prometedora de compuestos fenólicos y justificó la importancia del aprovechamiento de subproductos que generalmente son desechados por no tener un uso inmediato.

**Cuadro 2.1** Compuestos fenólicos presentes en semilla de mango.

Compuesto	Estructura <sup>1</sup>	Propiedades biológicas	Fuente
Mangiferina		Actividad antiinflamatoria y anticancerígena	(Mei et al., 2021)
Catequina		Actividad antioxidante contra radicales libres	(Ruengdech & Siripatrawan, 2021)
Quercetina		Actividad antiviral y potencial citotóxico	(Gansukh et al., 2021)

Ácido gálico		Actividad hepatoprotectora, antioxidante y antiinflamatoria	(Ojeaburu & Oriakhi, 2021)
Ácido elágico		Potencial neuroprotector y antioxidante	(Gupta et al., 2021)
Ácido siríngico		Actividad antimicrobiana y anticancerígena	(Kumar et al., 2021)

---

Estructuras: PubChem

### CAPÍTULO 3. IMPREGNACIÓN AL VACÍO

La impregnación al vacío (IV) es una tecnología empleada recientemente como técnica para el desarrollo y procesamiento de alimentos basada en la difusión. La IV cumple perfectamente la función de incorporar elementos enriquecedores a matrices alimenticias con el fin de crear alimentos con alto valor promotor de la salud, preservando y/o mejorando las características organolépticas (Fito y cols., 2001).

#### 3.1. Fundamentos de la impregnación al vacío.

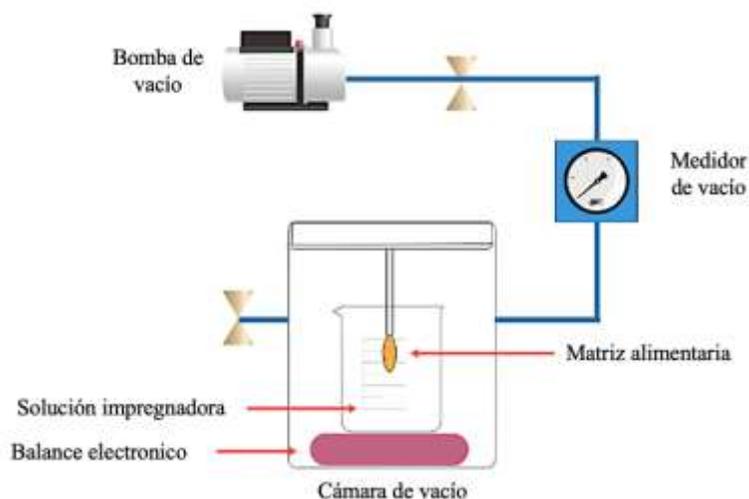
En la IV el principal objetivo es la inyección de la solución externa en la matriz alimentaria. Para lograr esto, se necesita la aplicación de vacío en el proceso de impregnación, por lo que la solución puede ser isotónica o hipertónica. Cabe destacar que este proceso es considerablemente más rápido en comparación con otras técnicas, como la deshidratación osmótica (unos pocos o varios minutos).

Durante el proceso de IV la solución impregnadora (SI) penetra en la matriz del tejido alimentario; esto puede cambiar o mejorar las propiedades de los alimentos significativamente. Los compuestos que contiene la SI se introducen principalmente en los espacios intracelulares y capilares del material, proporcionando diversos atributos que dan un valor agregado al alimento, como, por ejemplo, brindar un mayor valor nutritivo, (al incorporar, por ejemplo, compuestos bioactivos como polifenoles, probióticos o micronutrientes), prolongar la vida útil (reducción de pH) o modificación de los atributos sensoriales (introducción de azúcar, por ejemplo), entre otros (Duarte-Correa, Granda-Restrepo, Cortes, y Vega-Castro, 2020).

Durante la IV, los espacios libres y los capilares del material se llenan debido a una diferencia de presión inducida mecánicamente. El proceso consta de dos etapas: La fase de reducción de presión y la fase de la presión atmosférica. La impregnación del material se produce como consecuencia de dos fenómenos: mecanismo hidrodinámico (MHD) y fenómenos de deformación-relajación (FDR), que conducen al llenado de los capilares intracelulares. Después de la inmersión del material en la SI, la presión interna ( $p_i$ ) y externa ( $p_e$ ) del capilar son iguales a la presión atmosférica,  $p_{atm}$ , ( $p_i = p_e = p_{atm}$ ) y se igualan. El volumen inicial del capilar ( $V_{c0}$ ) se llena de gas. En la primera fase del proceso se reduce la presión ( $p_1 < p_{atm}$ ). Como resultado de la diferencia de presiones, el gas se elimina del capilar. Debido a que la presión reducida está actuando desde el exterior, provoca la deformación y dilatación del capilar, que es la primera parte del fenómeno de deformación-relajación (FDR). El volumen del capilar aumenta ( $V_{g1A} = V_{g0} + X_{c1}$ ). Esta etapa dura hasta que se alcanza el equilibrio de presión ( $p_i = p_e$ ). El capilar comienza parcialmente lleno de líquido, como resultado del MHD. En la segunda fase de impregnación al vacío la presión vuelve al valor atmosférico. Esto causa la transición del FDR a la fase de relajación. El capilar se contrae incluso en mayor medida que antes del inicio del proceso. Al mismo tiempo, como resultado de la acción de la presión capilar y descompresión, se observa una entrada intensa de líquido desde el exterior hacia el interior del capilar y el volumen final de gas en su interior disminuye. La fase de relajación es particularmente importante desde el punto de vista práctico, ya que la impregnación del tejido se produce en esta etapa. La

eliminación del vacío no debe ser demasiado rápida, ya que la igualación de presión demasiado rápida puede conducir al cierre de los vasos capilares y la inhibición del mecanismo hidrodinámico; debe existir un tiempo de restauración, antes de romper el vacío (Radziejewska-Kubzdela, Bieganska-Marecik, y Kidon, 2014).

El proceso de IV se lleva a cabo en un impregnador de vacío (Figura 3.1). Este consiste en un cámara de acero inoxidable, un sistema electromecánico que permite el movimiento de la muestra vertical y vibratoriamente, y una escala analítica para determinar la evolución de la masa de la muestra y del líquido de impregnación durante el proceso (Duarte-Correa y cols., 2020).



**Figura 3.1.** Representación esquemática del sistema de impregnación al vacío. Fuente: Duarte y cols., 2019.

### 3.2. Aplicaciones de la impregnación al vacío.

El interés por utilizar la IV proviene principalmente de la necesidad de mejorar la calidad de los productos alimenticios. Esta tecnología se aplica para modificar la composición de la matriz alimenticia a través del parcial desplazamiento de agua e impregnación de solutos, sin afectar la integridad estructural del material. Al elegir las apropiadas condiciones de funcionamiento en el proceso, como la presión de vacío, tiempo de vacío, tiempo de restauración, composición de la solución impregnadora, geometría de los trozos de muestra, porosidad de la matriz

alimenticia, etc., se obtendrán diversas aplicaciones de esta tecnología. (Zhao y Xie, 2004).

La industria alimentaria tiene un interés creciente en las frutas y productos a base de vegetales, especialmente con un valor agregado y con un mínimo grado de procesamiento, debido a su importante beneficio para la salud y favorables características organolépticas. La IV cumple con las funciones de deshidratación y formulación, proporcionando así amplias aplicaciones en el procesamiento de frutas y verduras. Algunas de las aplicaciones potenciales incluyen pretratamiento antes del secado o la congelación para mejorar el acabado final la calidad del producto y el desarrollo de la composición producto formulado mediante la incorporación de compuestos alimentarios funcionales a la matriz alimentaria (Chiralt y cols., 1999).

### **3.2.1. Aplicación de la IV para la pre-deshidratación de frutas y verduras.**

La deshidratación por eliminación parcial de agua para reducir la actividad de agua, ha sido ampliamente utilizado para extender la vida útil de las frutas y vegetales. Las frutas y verduras deshidratadas son normalmente utilizadas como ingrediente alimentario en muchos productos; siendo agregados a cereales, barras de granola, productos horneados y mezclas, o incluso para ser consumidos como botana. El método tradicional de secado con aire consume mucha energía y provoca pérdida significativa de sabor y nutrientes debido a la alta exposición al calor. La IV ha sido propuesta como pretratamiento antes del paso final de secado para lograr principalmente dos objetivos: disminuir el contenido de humedad antes del secado final para ahorrar energía e incorporar solutos funcionales, como agentes antimicrobianos o antioxidantes para mejorar calidad del producto (Zhao y Xie, 2004).

### **3.2.2. Aplicación de la IV para el pretratamiento antes de la congelación.**

La congelación es un método tradicional de procesamiento de frutas y conservación de vegetales; retiene mejor los nutrientes en el producto final que los de otros medios de conservación. Sin embargo, el cambio de fase del agua en el producto interrumpe integridad celular y compartimentación, aumentando así cambios

fisicoquímicos indeseables. La eliminación parcial de agua antes del proceso de congelación podría reducir el contenido de agua congelable y hacer que el producto congelado sea estable como resultado del aumento de la temperatura de transición vítrea de la fase líquida alimentaria máximamente concentrada. Se ha estudiado el pretratamiento con IV para mejorar la calidad de las frutas y verduras congeladas, principalmente reduciendo la pérdida por goteo y mejorando la calidad de la textura, además de ahorrar el consumo de energía durante la congelación. La incorporación de crioprotectores (generalmente soluciones hipertónicas de azúcar) o crioestabilizadores (por ejemplo, pectina de alto metoxilo y glicerol) mediante IV se ha sugerido para reducir la cantidad de agua congelable y reducir el daño por los cristales de hielo en frutas y hortalizas congeladas (Zhao y Xie, 2004).

### **3.2.3. Aplicación de la IV para la formulación y desarrollo de alimentos funcionales y nutricionalmente fortificados.**

En la actualidad existe un mayor interés por parte de los consumidores en el beneficio que aportan a la salud los alimentos, llevando a un desarrollo significativo de nutracéuticos y alimentos funcionales. En Latinoamérica, los alimentos envasados fortificados y funcionales alcanzaron ventas por 19.8 millones de dólares en el año 2019, con un aumento del 27% entre el 2014-2019. En México, el comportamiento de estos productos ha sido similar, ya que, en este mismo año el mercado de estos productos alcanzó ventas por 6.7 millones (Echeverría, 2020). La IV se ha considerado una excelente técnica para introducir solutos deseables en la estructura porosa de los alimentos y modificar convenientemente su composición original como un implemento para el desarrollo de nuevos productos. Los nutracéuticos pueden introducirse en productos hortofrutícolas utilizando la IV sin modificar su integridad (Zhao y Xie, 2004).

La IV se ha utilizado con éxito para incorporar vitaminas, minerales, microorganismos probióticos y compuestos bioactivos en frutas y verduras. Se ha reportado que la IV presenta resultados satisfactorios respecto a la incorporación de carotenoides, compuestos fenólicos totales, ácido ascórbico, aportando al mismo tiempo un mejor color y firmeza en matrices alimentarias de origen vegetal, como el

mango. Se han reportado diversos estudios que demuestran estos efectos de la IV, como la impregnación de polifenoles de residuos de uva Isabel a muestras de mango Tommy Atkins, mismas que obtuvieron valores de contenido de fenoles totales superiores a 7.74 mg EAG/g después de ser sometidas al proceso; y cuando esto se compara con muestras sometidas a presión atmosférica (4.33 mg EAG/g), demuestra que la aplicación de vacío es más eficiente en la impregnación de compuestos fenólicos (Batista de Medeiros y cols., 2019). La IV se realizó con éxito en otros trabajos, como la impregnación de antocianinas de jugo de arándanos en manzana (Castagnini, Betoret, Betoret, y Fito, 2015), impregnación de derivados de quercetina en rodajas de manzana (Betalleluz Pallardel, 2016) e impregnación de flavonoides de jugo de mandarina sobre manzana (Betoret y cols., 2012). Como era de esperar, todas las muestras mostraron valores más altos de compuestos fenólicos después de la impregnación, demostrando así que la IV resulta ser una tecnología eficaz para la formulación y desarrollo de alimentos funcionales, mismos que son posible someter a modelos de digestión *in vitro* para evaluar la potencial digestión, bioaccesibilidad y absorción de los compuestos que han sido impregnados en las matrices alimentarias.

## **CAPÍTULO 4. MODELOS *IN VITRO* DE DIGESTIÓN.**

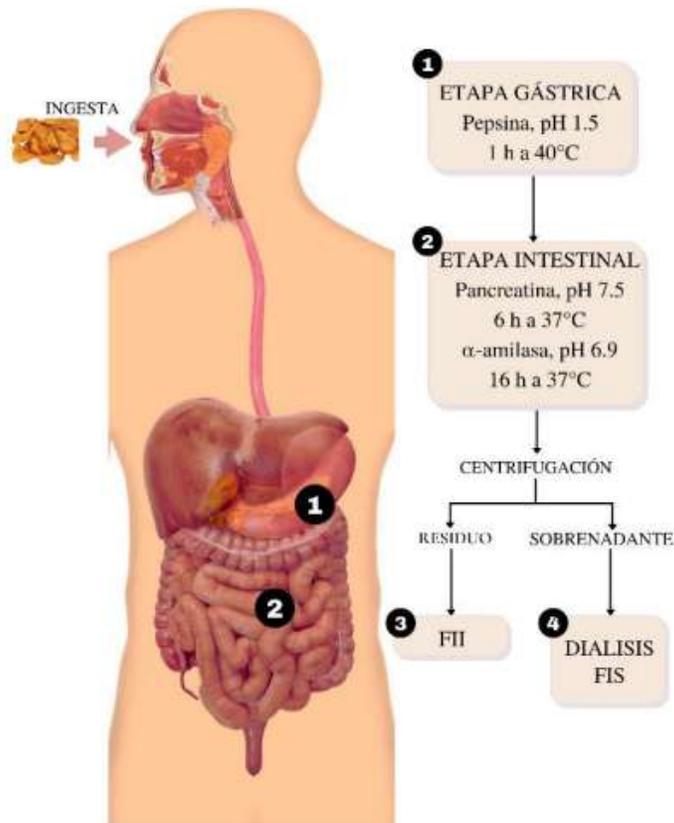
La digestión gastrointestinal es el proceso por el cual los nutrientes que ingerimos con los alimentos se transforman en las unidades que los conforman para poder ser absorbidos en el intestino. La digestión se divide en tres etapas: oral, gástrica e intestinal. En cada una de ellas, intervienen distintos mecanismos y agentes que se encargan de desestructurar los alimentos para permitir la liberación de nutrientes, su hidrólisis y eventual absorción. Estos incluyen las fuerzas mecánicas y movimientos peristálticos, la secreción de fluidos que contienen las enzimas digestivas y otros compuestos como las sales biliares que modifican el pH en cada etapa para favorecer la hidrólisis de nutrientes. A lo largo de las etapas de la digestión, los carbohidratos resultan en monosacáridos debido a la acción de las amilasas, lactasas y otras enzimas glicolíticas. Los enlaces que unen los aminoácidos en las proteínas son hidrolizados por las proteasas (pepsina, tripsina, y quimiotripsina principalmente), quedando éstos en forma de aminoácidos libres o pequeños péptidos. Por su parte, las lipasas, gástrica e intestinal, se encargan de hidrolizar los enlaces que mantienen unidos los ácidos grasos al glicerol en la molécula del triglicérido, dejándolos disponibles para ser absorbidos (Heredia Gutiérrez, Asensio Grau, Calvo Lerma, y Andrés Grau, 2021).

En los últimos años, se ha producido un creciente interés por conocer la digestión de los alimentos, debido a sus implicaciones en ciertas funciones y efectos sobre el organismo, siendo hoy en día el estudio del binomio digestión-salud una de las prioridades en distintos campos de investigación. En este contexto, existen diferentes metodologías que permiten el estudio del proceso digestión y sus implicaciones sobre la salud: los modelos de digestión *in vivo*, *in vitro* e *in sílico*, estos últimos siendo aún poco frecuentes y estandarizados. Por un lado, los estudios de digestión *in vivo* en animales o humanos son costosos, largos, presentan restricciones éticas y solo permiten conocer el estado de la digestión en el punto final mediante muestras de plasma o heces. En cambio, los estudios *in vitro* tienen numerosas ventajas, como rapidez, precio, reproducibilidad, muestreo a distintos puntos del proceso, y permiten reproducir varios experimentos simultáneamente. Existen diferentes modelos de digestión *in vitro*. Los modelos

dinámicos ofrecen una aproximación más fisiológica a la simulación ya que permiten establecer caudales de secreción de fluidos y simular la absorción. Los estáticos, son más sencillos, pero más rápidos, y han demostrado ser representativos de situaciones fisiológicas *in vivo*. La elección del modelo, y sus correspondientes adaptaciones, se harán en función de los objetivos planteados, de los alimentos a estudiar y las determinaciones analíticas a realizar (Heredia Gutiérrez y cols., 2021).

#### **4.1. Modelo *In vitro* para la evaluación de bioaccesibilidad.**

Los métodos *in vitro* tienen como base la simulación de la fisiología humana y se han desarrollado como métodos simples y reproducibles para estudiar la estabilidad de los componentes de los alimentos durante el proceso de la digestión, la micelarización, el transporte intestinal y el metabolismo (Saura-Calixto Fulgencio , García-Alonso Alejandra , Goñilsabel , y BravoLaura, 2000). Asimismo, el método para evaluar la bioaccesibilidad *in vitro* incluye un proceso de diálisis, aplicado principalmente para estudiar los nutrientes ingeridos y disponibles para su absorción en la pared intestinal posterior a su digestión (Mercado-Mercado, Montalvo-González, González-Aguilar, Alvarez-Parrilla, y Sáyago-Ayerdi, 2018). Sin embargo, la cantidad de nutrientes y fitoquímicos presente en el alimento no son en su totalidad bioaccesibles, esto varía según la matriz del alimento, el procesamiento, absorción celular, metabolismo y posterior transporte en el sistema circulatorio y la interacción entre los mismos (Clevidence Beverly , Paetau Inke , y Smith, 2000). Los métodos que permiten evaluar la bioaccesibilidad *in vitro* de los alimentos, son de gran apoyo para el entendimiento de la fracción máxima ingerido que puede encontrarse disponible para ser absorbido. Por lo tanto, la solubilidad y la diálisis están basados en la simulación del proceso de digestión gastrointestinal humano. Estos procesos consisten en un tratamiento secuencial enzimático en dos etapas, fracción gástrica con pepsina a pH 1.5 y fracción intestinal con pancreatina a pH 7.5 y  $\alpha$ -amilasa a pH 6.9 (Figura 4.1). Posteriormente, existe una fracción indigestible del alimento que también es estudiado (Blancas-Benitez y cols., 2015).



**Figura 4.1.** Modelo de bioaccesibilidad *in vitro*.

Fuente: (Blancas-Benítez, et al., 2015).

#### 4.1.1. Bioaccesibilidad *in vitro* de compuestos fenólicos.

La fracción de compuestos bioactivos liberados de la matriz alimentaria después de la digestión, que se solubilizan en el intestino delgado para la absorción y circulación sistemática, se conoce generalmente como la fracción bioaccesible. Desde el punto de vista nutricional y funcional de los alimentos, la información sobre la concentración de compuestos bioactivos que alcanza la fracción bioaccesible es mucho más importante que la concentración de estos compuestos en el alimento correspondiente. Además, también es importante determinar la influencia de los alimentos matriz sobre la bioaccesibilidad de compuestos bioactivos, especialmente en alimentos procesados o semiprocados, porque son medios complejos que permiten interacciones entre compuestos bioactivos, nutrientes u otros constituyentes de los alimentos. Se han desarrollado varios métodos *in vitro* para

investigar los efectos de la matriz alimentaria y de diferentes técnicas de procesamiento sobre la capacidad de los nutrientes o compuestos bioactivos, como los polifenoles, para estar disponibles para la absorción.

La liberación de compuestos fenólicos puede ocurrir durante digestión gastrointestinal por hidrólisis enzimática, aunque hay evidencia que indica que el procesamiento de los alimentos afecta la bioaccesibilidad y biodisponibilidad de compuestos bioactivos; la información sobre la influencia del procesamiento en la bioaccesibilidad de los compuestos fenólicos es todavía muy limitada (Rodríguez-Roque y cols., 2015). Sin embargo, se ha estudiado la liberación de compuestos fenólicos de diferentes productos de origen vegetal en diferentes etapas de la digestión, como por ejemplo, mango, papaya y piña, los cuales son una importante fuente de compuestos fenólicos de alto peso molecular; mismos en los que se ha reportado un promedio del 50% de bioaccesibilidad de compuestos fenólicos totales en la etapa gástrica de la digestión, y aproximadamente 10% más en la etapa intestinal, asociando los compuestos no bioaccesibles en estas etapas de la digestión a carbohidratos de almidón de la matriz alimentaria (Velderrain-Rodríguez y cols., 2016).

## CAPÍTULO 5. MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología se dividió en 2 etapas, las cuales serán descritas a continuación.

### 5.1. Etapa 1:

#### 5.1.1. Diseño experimental

En esta etapa se trabajó con un diseño factorial fraccionado  $3^{3-1}$  para optimizar las condiciones de impregnación al vacío, el cual constó de 3 factores y 3 niveles (Cuadro 5.1). Se realizó una aleatorización de los 9 diferentes tratamientos obtenidos, junto con sus triplicados (27 corridas), teniendo como variable de respuesta la cantidad de Fenoles Solubles Totales (FST), Polifenoles Hidrolizables (PH) y la capacidad antioxidante determinada por ensayos ABTS, DPPH y FRAP.

**Cuadro 5.1** Diseño experimental correspondiente a la etapa 1

Tratamientos	Espesor de la rodaja (mm)	Tiempo de vacío (min)	Tiempo de restauración (min)	Variables de respuesta
T1	1.50	5.00	5.00	Fenoles solubles totales (mg EAG/g)
T2	1.50	10.00	10.00	
T3	1.50	15.00	15.00	Polifenoles Hidrolizables (mg EAG/g)
T4	2.00	5.00	10.00	
T5	2.00	10.00	15.00	ABTS (mmol ET/g)
T6	2.00	15.00	5.00	FRAP (mmol ET/g)
T7	3.00	5.00	15.00	DPPH (mmol ET/g)
T8	3.00	10.00	5.00	
T9	3.00	15.00	10.00	

Diseño en STATISTICA, StatSoft. Inc.

### **5.1.2. Selección del Material vegetal**

Se recolectaron jícamas de leche en madurez de consumo (*Pachyrhizus erosus L.*) de un mercado local en Tepic, Nayarit, con un peso promedio de  $500 \pm 100$  g, humedad relativa del 70 a 80% y de forma homogénea. Se realizó un lavado por inmersión con agua corriente y con un cepillo con cerdas de nailon se retiraron los restos orgánicos.

### **5.1.3 Extracción del polifenoles en la semilla de mango**

El extracto se obtuvo a partir de harina de semilla de mango (*Mangifera indica L.* 'Ataúlfo') obtenida en la cosecha del año 2020, partiendo de una extracción por ultrasonido (HIELSCHER, UP400S, Alemania) con un sonotrodo H40 en un baño térmico (TERLAB TE-840D) con temperatura controlada ( $60 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) utilizando una solución de agua-etanol (80:20) como medio de extracción en un vaso de precipitado a una relación solvente-sólido (35:1), a pulsos de 1 s por 8 min a una amplitud del 40%. El extracto obtenido se filtró en un matraz kitasato y un embudo de filtración para separar la fase líquida de los residuos. Después, los extractos fueron concentrados en un rotavapor (BÜCHI Labortechnik, R-100, B-100-F105, Flawil, Alemania) durante 1 h con un control de temperatura de  $60 \text{ }^{\circ}\text{C}$  y el refrigerante a una temperatura de  $8 \text{ }^{\circ}\text{C}$  a 160 mBar de presión. Finalmente, las muestras fueron filtradas en un sistema a vacío con una bomba (NEUBERGE, Alemania) y matraz de filtración kitasato (PYREX®, 1000 mL, Francia) con embudo de filtración. El producto obtenido se congeló a  $-20 \text{ }^{\circ}\text{C}$  y se liofilizó (Labconco, FreeZone 6.0, USA) a  $-50 \text{ }^{\circ}\text{C}$  y 0.12 mBar de presión por 24 h, se molió (Nutribullet, NBR-0804B, USA) y se tamizó hasta obtener un tamaño de partícula de  $500 \mu\text{m}$ .

### **5.1.4 Preparación de la materia vegetal e impregnación al vacío**

Partiendo de las jícamas descritas en la sección 5.1.2, se cortaron rodajas con los espesores indicados en el diseño experimental (Cuadro 5.1) y diámetros de 4.5 cm. Para a el proceso de IV, se tomó la metodología de Duarte-Correa y cols. (2020) con algunas modificaciones. Las rodajas de jícama fueron sumergidas en la solución impregnadora que fue preparada a partir del extracto de semilla de mango a una

concentración de 3 mg/mL en agua. La IV se realizó en una cámara de vacío a una presión constante de 150 mmHg y los tiempos de vacío y restauración se llevaron a cabo acorde al diseño experimental (sección 5.1.1). Las rodajas impregnadas se congelaron a -20 °C y se liofilizaron (Labconco, FreeZone 6.0, USA) a -50 °C y 0.12 mBar de presión por 24 h, se molieron (Nutribullet, NBR-0804B, USA) y se tamizaron hasta obtener un tamaño de partícula de 500 µm.

#### **5.1.5. Extracción y cuantificación de Fenoles Solubles Totales (FST) y Polifenoles Hidrolizables (PH) en tratamientos de jícama impregnada**

Se realizó una extracción de compuestos fenólicos a partir de la metodología de Pérez- Jiménez et al., (2008) a las rodajas impregnadas (250 mg) con solución de agua acidificada con metanol (10 mL, 0.8% de HCl, 50:50 v/v) mediante agitación sinérgica (Agitador Orbital, modelo Reax2, Heidolph Instruments, DE) durante 1 h a 16 rpm. Los extractos se centrifugaron (Hermle, Z32HK, Labortechnik GmbH, Wehingen, Alemania) (8000 rpm durante 10 min a 4°C), los sobrenadantes se recuperaron y los residuos se volvieron a extraer con 10 mL de una solución de acetona (70:30, v/v, 60 min). Los sobrenadantes se combinaron en un matraz de 25 mL con la combinación de solución de metanol acidificada y solución de acetona (50:50, v/v).

La cuantificación de FST a los tratamientos de impregnación al vacío se realizó según lo descrito por Montreau (1972) y modificado por Álvarez-Parrilla Emilio, De la Rosa Laura A, Ryszard Amarowicz§, y Fereidoon (2011). Se tomaron alícuotas de 250 µL a los sobrenadantes de la extracción y se mezclaron con 1000 µL de Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (carbonato de sodio, 7.5, p/v). Después de 3 minutos se añadió el reactivo de Folin-Ciocalteu (1250 µL) y las muestras se calentaron en un baño de agua durante 15 min a 50 °C. Se utilizó un lector de microplacas (Bio-Tek®, Synergy HT, Winooski, VT, EE. UU.) en una detección espectrofotométrica a 750 nm multimodal con placas de 96 pocillos y el programa Gen5. Se utilizó ácido gálico como estándar con una curva de calibración (0.0125 – 0.2 mg/mL, R<sup>2</sup>, 0.9999) y los resultados se reportaron como mg equivalentes de ácido gálico (mg EAG/mL de extracto).

El contenido de PH se obtuvo con base al método propuesto por Hartzfeld Pablo W., Forkner Rebeca, Cazador Marca D., y E. (2002). Los residuos obtenidos de la extracción acuosa se dispersaron y se agregó 10 mL de metanol y 1 mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Los extractos se incubaron en un baño de agua con agitación a 70°C durante 22 h. Se enfriaron a temperatura ambiente y se centrifugaron a 6000 rpm durante 10 min y luego se recuperaron los sobrenadantes. Posteriormente, los residuos se lavaron dos veces con 5 mL de agua destilada y los sobrenadantes se mezclaron en un matraz volumétrico de 25 mL. La cuantificación se realizó como se describió anteriormente en el método de FST, calculando la concentración de PH con la curva de calibración del ácido gálico.

#### **5.1.6. Evaluación de la capacidad antioxidante (CAOX) por los métodos ABTS, DPPH y FRAP**

El análisis de captación de radicales se determinó mediante el ensayo de radicales de ácido 2,2-azinobis-3-etilbenzotiazolina-6-sulfónico (ABTS) como lo describen Re Roberta y cols. (1999). El ABTS (7 mM) se disolvió en persulfato de potasio (2.42 mM) y se mantuvo en la oscuridad a temperatura ambiente durante 14 h. La solución ABTS se diluyó con tampón fosfato hasta una absorbancia de 0.80 ( $\pm$  0.02) utilizando un lector de microplacas a 734 nm (Biotek, Synergy HT). Se tomaron 20  $\mu$ L de muestra de la extracción orgánica-acuosa y se mezclará con 255  $\mu$ L de solución diluida ABTS. Los valores de ABTS producidos por la concentración se interpolaron a partir de una curva estándar de Trolox (37.5-600  $\mu$ M, R<sup>2</sup>-0.9997). El Trolox (6-hidroxi-2,5,7,8-tetrametilcromano-2-carboxílico) fue utilizado como estándar, el cual fue diluido en una solución (50:50, v/v) de metanol acidificado con HCl (10 ml, 0.8% de HCl, 50:50 v/v) y solución de acetona (70:30, v/v, 60 min). Los resultados se expresaron como mmol equivalentes de Trolox (mmol ET/g BS) utilizando una curva de calibración (concentraciones de 37.5 – 600  $\mu$ M/mL).

La actividad antirradical se evaluó mediante la disminución del radical DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidracilo, D9132, Sigma Aldrich, EUA) a 517 nm, utilizando un lector de microplacas, según el procedimiento descrito por Prior, Wu, y Schaich (2005) y modificado por Álvarez-Parrilla Emilio y cols. (2011). Se tomaron alícuotas de 20  $\mu$ L

de los extractos y se mezclaron con 200  $\mu\text{L}$  de solución metanólica DPPH (190 M) durante 10 min. El Trolox fue utilizado como estándar. Los resultados se expresaron como mmol de equivalentes de Trolox (mmol ET/g BS) disponibles en los extractos en contraste con la curva de calibración (concentraciones de 37.5 - 600  $\mu\text{M}/\text{mL}$ ).

El análisis de capacidad antioxidante del reductor férrico (FRAP) se realizó según lo descrito por Benzie Iris F.F. y Strain (1996) y modificado por Álvarez-Parrilla Emilio y cols. (2011). La solución FRAP 10:1:1 (v/v/v) se disolvió en un tampón de acetato de sodio (0.3 M; pH 3.6), TPTZ-HCl (10 mM, 40 mM) y cloruro férrico hexahidratado (20 mM); se calentó a 37 °C antes de mezclarla con las muestras. Se tomaron 24  $\mu\text{L}$  de las muestras de los extractos y se mezclaron con 180  $\mu\text{L}$  de solución de FRAP y la absorbancia se midió a 595 nm después de 30 minutos utilizando un lector de microplacas (Biotek, Synergy HT). El Trolox fue utilizado como estándar. Los resultados se expresaron como mmol de equivalentes Trolox (mmol ET/g BS) usando una curva de calibración (concentraciones de 0.0081 - 0.13 mM/mL).

#### 5.1.7. Análisis estadístico

Los resultados se expresaron como la media  $\pm$  desviación estándar (n=3). Se utilizó un análisis de varianza (ANOVA) bidireccional con una prueba de LSD de Fisher post hoc para determinar el efecto de los factores.

Para la optimización del proceso de impregnación al vacío, los resultados fueron analizados por superficie de respuesta, tomando en cuenta Fenoles Solubles Totales (FST) como variable de respuesta y espesor (mm), tiempo de vacío (min) y tiempo de restauración como factores. Se llevó a cabo mediante la ecuación polinomial cuadrática de segundo grado (Ec. 1):

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{13} X_1 X_3 + \beta_{23} X_2 X_3 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \beta_{33} X_3^2$$

(Ec. 1)

donde Y es la respuesta estimada,  $\beta_0$  es la constante,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  y  $\beta_3$  son coeficientes lineales,  $\beta_{12}$ ,  $\beta_{13}$  y  $\beta_{23}$  son coeficientes de interacción entre los tres factores y  $\beta_{11}$ ,  $\beta_{22}$  y  $\beta_{33}$  son coeficientes cuadráticos. Se realizó un análisis de regresión múltiple para obtener los coeficientes y la ecuación se podrá utilizar para predecir la respuesta. Todos los análisis se realizaron utilizando el software STATISTICA, versión 12.0 (StatSoft. Inc. 1984–2014, Tulsa, OK, EE. UU.) con un 95% de nivel de confianza ( $\alpha=0.05$ ).

## 5.2. Etapa 2:

### 5.2.1. Diseño experimental

Se realizó un diseño factorial simple donde las variables independientes consideradas fueron los tratamientos jícama fresca (JI), jícama impregnada con extracto de semilla de mango del tratamiento óptimo (TO) en la etapa anterior y jícama impregnada con agua (TA). Las variables de respuesta que se tomaron en cuenta fueron el análisis sensorial, fenoles solubles totales (FST), capacidad antioxidante (CAOX) y bioaccesibilidad (Cuadro 5.2).

**Cuadro 5.2** Diseño experimental correspondiente a la etapa 2

<b>Variables independientes</b>	<b>Variables de respuesta</b>
Tratamiento:	Análisis sensorial
JI	Fenoles Solubles Totales (FST)
TO	CAOX (ABTS, DPPH, FRAP)
TA	Composición proximal (Humedad, cenizas, carbohidratos totales, proteína, fibra dietética total, grasas)
	Bioaccesibilidad

Diseño en STATISTICA, StatSoft. Inc.

### 5.2.2. Evaluación sensorial.

Se realizaron suficientes rodajas de jícama impregnada con extracto de semilla de mango (TO) de acuerdo a las condiciones del mejor tratamiento descrito en la

sección 5.1.7 y al método descrito en la sección 5.1.4. Se prepararon también, rodajas de jícama impregnada con agua destilada (TA) de acuerdo al método de la sección 5.1.4, y rodajas de jícama fresca (JI) al mismo grosor y diámetro que las muestras anteriores. Estas dos últimas se utilizaron como control en los procesos consecutivos a esta sección.

La evaluación sensorial se realizó con la metodología de Akman Perihan K, Uysal E., Ozkaya Gulsum U, Fatih Tornuk, y Durak M. Zeki (2019), con modificaciones, en la cual se consideró un tamaño de muestra de 20 panelistas no entrenados, mismos que accedieron a participar de manera voluntaria utilizando un muestreo no probabilístico por conveniencia. Los participantes realizaron una prueba hedónica con escala de 10, dónde el nivel más bajo de preferencia fue “Me disgusta mucho”, el nivel intermedio “Ni me gusta ni me disgusta” y el nivel más alto “Me gusta mucho”. Se evaluaron los atributos sensoriales de olor, color, sabor y textura. Se utilizó una muestra de T1, T2 y JI, con los códigos C-589 (T1), P-145 (T2) y S-302 (JI).

La evaluación sensorial se realizó en tres formatos de evaluación (Anexo 1) por panelista, entregado previamente a la prueba, y mismos dónde se describen las indicaciones para llevar a cabo correctamente la evaluación.

### **5.2.3. Análisis proximal en tratamientos de jícama.**

Se realizó la determinación de humedad al igual que la cuantificación de cenizas, proteínas, carbohidratos totales, fibra dietética total y grasas en muestras de los tratamientos de jícama JI, TO y TA.

#### **5.2.3.1. Determinación de humedad.**

Para la determinación de humedad se utilizó el método descrito en la Association of Analytical Communities (AOAC), el cual está basado en la determinación gravimétrica de la pérdida de masa de la muestra desecada hasta un peso constante en estufa al aire (AOAC, 1995). El porcentaje de humedad se determinó con la siguiente ecuación:

$$\%H = \frac{Ph - Ps}{Ps} \times 100$$

(Ec. 2)

Dónde:

%H = Porcentaje de humedad

Ph= peso húmedo de la muestra (g)

Ps= peso seco de la muestra (g)

### 5.2.3.2. Cuantificación de proteínas.

La cuantificación de proteína de las muestras de jícama fue a través del método 920.87 de la AOAC (1995). Se utilizaron 0.2 g de muestra, los cuales se colocaron en tubos Kjeldhal, se adicionó ácido sulfúrico (3 mL) y una mezcla catalizadora ( $\text{CuSO}_4 + \text{Na}_2\text{SO}_4$ ) (1.5 g) para la digestión de la muestra en un bloque de digestión (Speed Digester, BÜCHI K-425, Suiza) a 420°C, hasta obtener una coloración verde esmeralda. La muestra se dejó enfriar para realizar su posterior destilación. En los tubos con las muestras digeridas se agregaron 10 mL de agua destilada y NaOH al 36% hasta que la muestra viró a una tonalidad café. Las muestras fueron colocadas en un sistema BÜCHI K-355 (Suiza) para destilarse por 5 min. El destilado se colectó en matraces Erlenmeyer, al cual previamente se le adicionaron 25 mL de HCl (0.1 N), para su titulación con NaOH 1 N. El cálculo del porcentaje de nitrógeno y del contenido de proteína se hizo utilizando las ecuaciones 3 y 4, respectivamente.

$$\%N = \frac{(mL \text{ de HCl})(N \text{ HCl}) - (mL \text{ NaOH gastados})(N \text{ NaOH}) * 0.0014}{\text{Peso muestra g}}$$

(Ec.3)

Donde:

%N = Porcentaje de nitrógeno amoniacal.

mL HCl = Mililitros colocados en matraz Erlenmeyer que reciben el destilado.

N HCl = Normalidad del HCl.

mL NaOH gastados = Mililitros gastados durante la titulación.

N NaOH = Normalidad de NaOH.

0.014 = Miliequivalentes de nitrógeno.

$$\%P = \%N * 5.3$$

**(Ec.4)**

#### **5.2.3.3. Determinación de extracto etéreo.**

La cuantificación del contenido de lípidos en las muestras de jícama se hizo utilizando el método 920.39 de la AOAC (1995). Se emplearon 3 g de muestra seca que fue colocada al interior de cartuchos de celulosa a peso constante, posteriormente estos fueron colocados en el equipo Soxhlet, equipado con un matraz bola a peso constante para la recuperación y cuantificación posterior de los lípidos contenidos en las muestras. El solvente utilizado para el lavado de las muestras fue éter de petróleo, que se hizo recircular durante 6 horas a una temperatura de 80 °C. Una vez concluida la extracción de lípidos de la muestra, los matraces bola que contenían los lípidos fueron llevados a peso constante, para poder determinar el contenido de extracto etéreo por diferencia de peso. Para el cálculo del porcentaje de extracto etéreo se utilizó la ecuación 5.

$$\% \text{ Extracto etéreo} = \frac{\text{Peso de los lípidos recuperados en el matraz}(g)}{\text{Peso de la muestra } (g)}$$

**(Ec. 5)**

#### **5.2.3.4. Cuantificación de cenizas.**

La metodología empleada para cuantificación de cenizas fue la descrita por la AOAC (2000). Se pesaron 2 g de muestra seca en un crisol de porcelana, puesto previamente a peso constante. Los crisoles se colocaron sobre la flama de un mechero Fisher para quemar la muestra, y así poder eliminar la mayor parte de la materia orgánica. Posteriormente, los crisoles con los residuos de la muestra se

colocaron dentro de una mufla a 550°C por 5 h, para su total incineración. Las muestras se sacaron y se dejaron enfriar en un desecador, para el registro posterior de su peso final. El porcentaje de cenizas se calculó por diferencia de pesos con la ecuación 5 (Ec. 5).

$$\%Cenizas = \frac{\text{Peso de crisol con ceniza (g)} - \text{Peso de crisol (g)}}{\text{Peso de muestra g}} * 100$$

(Ec. 5)

### 5.2.3.5. Determinación de fibra dietética total.

Para la determinación de fibra dietética se utilizaron 0.5 g de muestra a los que se adicionaron 25 mL de buffer de fosfatos (0.08 M, pH 6). Se realizaron tres hidrólisis enzimáticas consecutivas. La primera hidrólisis se hizo con 25 µL de α-amilasa termoestable (Sigma, A-3306) (pH 6, 90 °C, 35 min), la segunda con 50 µL proteasa (50 mg/mL, Proteasa Tipo VIII de *Bacillus licheniformis*, Sigma Aldrich, P3910) (pH 7.5, 60 °C, 35 min) y la tercera con 150 µL amiloglucosidasa (Sigma Aldrich, A9913) (pH 4.5, 60 °C, 35min). Las muestras fueron centrifugadas (6000 rpm, 15 min a 4 °C). El sobrenadante fue separado y el pellet fue lavado con agua destilada, los sobrenadantes se mezclaron y aforaron a 100 mL para dializarse en membranas (14000 Da, Sigma Aldrich, D9652) por 48 h. Transcurrido el tiempo de diálisis el contenido (fibra soluble) se aforó a 100 mL. La hidrólisis de los polisacáridos que conforman la fibra soluble se hizo con 17 mL del extracto y 1 mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> concentrado, en un baño María a 100 °C (90 min). El contenido de fibra soluble se cuantificó con el reactivo DNS (10 g de ácido 3-5-di-nitrosalicílico + 16 g de NaOH + 300 g de tartrato sódico-potásico tetrahidratado) a 530 nm y una curva estándar de glucosa (Englyst and Cummings, 1988). El pellet fue lavado (con etanol al 96 % y acetona) y posteriormente secado. Se le adicionaron 3 mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 12 M y se mantuvo en baño María a 37 °C (1 h), posteriormente se adicionaron 33 mL de agua destilada y nuevamente se colocó en un baño María a 100 °C (90 min) para hidrolizar la fibra insoluble. La muestra se centrifugo (6000 rpm, 15 min, 4 °C), y el sobrenadante fue recuperado, el pellet fue lavado tres veces con agua destilada, la

fracción líquida se aforó a 100 mL. La cuantificación de la fibra insoluble se hizo de forma semejante a la cuantificación de fibra soluble. El residuo sólido (lignina de Klason) se secó a 105 °C y se cuantificó por gravimetría. La fibra dietética total se consideró como la suma de la fibra soluble, la fibra insoluble y la lignina de Klason.

#### **5.2.3.6. Determinación de carbohidratos totales.**

La determinación de carbohidratos totales se obtuvo por la diferencia de 100 menos la suma del contenido de humedad, cenizas, proteína, fibra dietética total y grasas, expresados en g/100g (base húmeda).

#### **5.2.4. Extracción y cuantificación de Fenoles Solubles Totales (FST) y Polifenoles Hidrolizables (PH) en tratamientos de jícama.**

Se realizó la cuantificación de FST y PH en los tratamientos JI, T1 y T2, con la metodología descrita en la sección 5.1.5.

#### **5.2.5. Evaluación de la capacidad antioxidante (CAOX) por los métodos ABTS, DPPH y FRAP en tratamientos de jícama.**

Se evaluó la CAOX en los tratamientos JI, T1 y T2, con las metodologías descritas en la sección 5.1.6.

#### **5.2.6. Digestión gastrointestinal *in vitro* de los tratamientos de jícama.**

Las muestras fueron sometidas a un modelo de digestión gastrointestinal *in vitro*, partiendo de la metodología descrita por Cruz-Trinidad, Sánchez-Burgos, Tovar, Sáyago-Ayerdi, y Zamora-Gasga (2019). Se tomaron 300 mg de los 3 tratamientos liofilizados y se les agregó pepsina (300 mg/mL, p-7000, Sigma-Aldrich) suspendida en un tampón de HCl-KCl 0.2 M, a un pH de 1.5 por 1 h a 40 °C para simular la digestión gástrica. Después, se les agregó pancreatina (5 mg/mL, P1750, Sigma-Aldrich) suspendida en un tampón fosfato 0.1 M a pH de 7.5 por 6 h a 37 °C. Pasado ese tiempo se les agregó tampón Tris-Maleato 0.1 M y otra enzima ( $\alpha$ -Amilasa, 120 mg, A-6255, Sigma-Aldrich) a un pH de 6.9 ajustado, se incubaron a 37 °C por 16 h. Se realizó una centrifugación (6000 rpm, 4 °C, 10 min) y se separó el sobrenadante del residuo; los polifenoles extraíbles (PE) del sobrenadante se

consideraron como los liberados en la fracción intestinal (FIInt) y fueron calculados como fenoles solubles totales (sección 5.1.5). Los polifenoles no extraíbles (PNE) se cuantificaron a partir del residuo de la centrifugación con la técnica de polifenoles hidrolizables (sección 5.1.5). Los polifenoles totales (mg EAG/g BS) se calcularon como: (PE + PNE después de digestión intestinal). Los tubos restantes fueron centrifugados (6000 rpm, 4 °C, 10 min) para separar las fracciones indigestibles solubles (FIS) e insolubles (FII). El residuo de la centrifugación (PNE) se consideró como la FII en el intestino delgado y se utilizó para determinar los compuestos polifenólicos asociados a la FII, partiendo de una extracción acuosa-orgánica (sección 5.1.5) y una hidrólisis química de polifenoles hidrolizables (sección 5.1.5). Por lo tanto, los compuestos fenólicos de la FII fueron la suma de EP y el contenido PNE en dicha fracción. El sobrenadante se sometió a un proceso de diálisis (D9651, 12-14 KDa, Sigma Aldrich) durante 48 h para simular la absorción pasiva. Después de la diálisis, el contenido de PE asociados a la FIS se determinó por fenoles solubles totales (sección 5.1.5). Los polifenoles no biodisponible (PNB) se cuantificaron como: (PE en FIS + PE en FII+PNE en FII). Polifenoles potencialmente disponibles para la absorción (PPDPA, mg EAG/bs) fueron calculados como la diferencia entre los polifenoles totales (PT) y los polifenoles no biodisponibles (PNB). La bioaccesibilidad potencial (%) se calculó como los polifenoles extraíbles en la fase intestinal – los PNB. La potencial habilidad de absorción (PHA, %) se calculó como  $PPDPA / PT \times 100$ . Los polifenoles potencialmente disponibles para la absorción por porción se calcularon como  $[(100 - \% \text{ Humedad}) \times (PPDPA / 100)] \times 30$ . Finalmente, la carga de polifenoles por porción (CPP) se calculó como  $(PHA \times PPDPA \times 30) / 100$ .

### **5.2.7. Evaluación de la capacidad antioxidante (CAOX) de las fracciones de la digestión *in vitro*.**

Las fracciones intestinales (FIInt) y fracciones indigestibles solubles (FIS) e insolubles (FII), fueron evaluadas por capacidad antioxidante por los métodos de FRAP, ABTS y DPPH descritas en la sección 5.1.6.

### **5.2.8. Análisis estadístico.**

Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) y una prueba LSD de comparación de medias a todos los tratamientos con un  $\alpha=0.05$  y 95% de nivel de confianza, mediante el uso del software Statistica versión 12 (StatSoft, USA).

## **CAPÍTULO 6. RESULTADOS Y DISCUSIONES.**

En este apartado se describieron, analizaron y discutieron los resultados obtenidos de la optimización del proceso de impregnación al vacío (IV) del extracto de la semilla de mango en rodajas de jícama según el diseño experimental descrito en la sección (5.1.1), dónde se determinó el mejor tratamiento. De igual manera fueron analizados los resultados de la evaluación sensorial, la caracterización proximal, cuantificación de fenoles solubles totales (FST), polifenoles hidrolizables (PH), capacidad antioxidante y los resultados logrados en el análisis de bioaccesibilidad *in vitro* de las muestras de jícama fresca (JI), jícama impregnada con extracto de semilla de mango o “tratamiento óptimo” (TO), y jícama impregnada con agua o “tratamiento control” (TA).

### **6.1 Optimización del proceso de impregnación al vacío.**

Se realizó la cuantificación de FST, PH y capacidad antioxidante por los ensayos ABTS, DPPH y FRAP, de los 9 diferentes tratamientos descritos en el diseño experimental (sección 5.1.1), para poder optimizar el proceso de IV y así poder determinar que tratamiento cuenta con las condiciones más eficientes de proceso con base en los resultados expresados por las variables de respuesta. Los resultados obtenidos (Cuadro 6.1) expresan que, en cuanto al contenido de FST, las muestras de los tratamientos T3, T1 y T2 son los que registraron el mayor contenido de estos (11.79, 11.36 y 10.37 mg EAG/g BS respectivamente), y de igual manera, estas muestras se observan estadísticamente iguales entre sí ( $p > 0.05$ ). Respecto al contenido cuantificado de PH, de igual manera, todas las muestras se observaron estadísticamente ( $p > 0.05$ ) y se encontraron valores entre 5.55 y 7.90 mg EAG/g BS. En relación con los resultados obtenidos de las evaluaciones de capacidad antioxidante (Cuadro 6.1), se reportó que los tratamientos T3, T2 y T5 demuestran mayor capacidad antioxidante en el ensayo ABTS (157.15, 154.10 y 132.09 mmol ET/g BS), y al mismo tiempo evidenciando ser estadísticamente iguales entre sí ( $p > 0.05$ ). En el ensayo DPPH las muestras de los tratamientos T1, T3 y T6 son las que obtuvieron mayor contenido de mmol ET/g BS (36.83, 35.63 y 35.25), siendo estas estadísticamente semejantes ( $p > 0.05$ ). En cuanto a la

actividad quelante (FRAP), los tratamientos T3, T4 y T1 reportaron mayor contenido de mmol ET/g BS (80.04, 77.20 y 73.48), sin embargo, los resultados siguen siendo iguales entre ellos de manera estadística ( $p > 0.05$ ).

**Cuadro 6.1** Cuantificación de fenoles solubles totales (FST), polifenoles hidrolizables (PH), ABTS, DPPH, FRAP en tratamientos de impregnación al vacío (diseño experimental) <sup>1</sup>. (ANOVA de una vía).

Análisis					
T	FST (mg EAG/g BS)	PH (mg EAG/g BS)	ABTS (mmol ET/g BS)	DPPH (mmol ET/g BS)	FRAP (mmol ET/g BS)
T1	11.36 ± 1.99 <sup>cd</sup>	6.50 ± 0.85 <sup>a</sup>	128.53 ± 7.55 <sup>abc</sup>	36.83 ± 6.39 <sup>a</sup>	73.48 ± 19.13 <sup>abc</sup>
T2	10.37 ± 0.58 <sup>bcd</sup>	6.69 ± 0.89 <sup>a</sup>	154.10 ± 22.41 <sup>c</sup>	34.90 ± 4.01 <sup>a</sup>	70.32 ± 20.42 <sup>abc</sup>
T3	11.79 ± 0.76 <sup>d</sup>	6.82 ± 0.19 <sup>a</sup>	157.15 ± 31.89 <sup>c</sup>	35.63 ± 3.48 <sup>a</sup>	80.04 ± 16.02 <sup>c</sup>
T4	9.75 ± 0.19 <sup>b</sup>	5.55 ± 0.47 <sup>a</sup>	128.01 ± 18.17 <sup>abc</sup>	34.83 ± 3.53 <sup>a</sup>	77.20 ± 8.49 <sup>bc</sup>
T5	8.91 ± 0.37 <sup>ab</sup>	6.17 ± 0.69 <sup>a</sup>	132.09 ± 12.85 <sup>bc</sup>	31.24 ± 3.42 <sup>ab</sup>	59.17 ± 9.45 <sup>abcd</sup>
T6	10.10 ± 0.75 <sup>bc</sup>	6.69 ± 0.63 <sup>a</sup>	127.59 ± 24.02 <sup>abc</sup>	35.25 ± 4.08 <sup>a</sup>	63.56 ± 10.04 <sup>abcd</sup>
T7	8.18 ± 0.44 <sup>a</sup>	5.84 ± 1.73 <sup>a</sup>	98.59 ± 8.45 <sup>a</sup>	31.93 ± 1.64 <sup>ab</sup>	55.84 ± 3.50 <sup>ad</sup>
T8	8.09 ± 0.74 <sup>a</sup>	6.16 ± 0.71 <sup>a</sup>	107.11 ± 18.67 <sup>ab</sup>	30.73 ± 0.74 <sup>ab</sup>	57.87 ± 4.80 <sup>abd</sup>
T9	7.92 ± 0.33 <sup>a</sup>	7.90 ± 3.39 <sup>a</sup>	110.27 ± 9.65 <sup>ab</sup>	27.48 ± 2.63 <sup>b</sup>	48.42 ± 5.83 <sup>d</sup>

<sup>1</sup>Los resultados están expresados como la media ± desviación estándar (n=3). Las diferentes letras entre cada columna representan diferencias entre los tratamientos. Los resultados de fenoles solubles totales (FST) y polifenoles hidrolizables (PH) están expresados en mg EAG/g BS. Los resultados de la capacidad antioxidante ABTS, DPPH y FRAP están expresados en mmol ET/g. T, tratamiento; BS, base seca.

Teniendo en cuenta el anterior análisis, se puede inferir que el tratamiento que muestra las mejores condiciones de proceso para la impregnación de compuestos fenólicos es el T3, el cual cuenta con las condiciones descritas en el cuadro 5.1. Sin embargo, se realizó el análisis de superficie de respuesta, como se describe en la sección 5.1.7 para obtener las mejores condiciones en los factores de espesor (ESP; mm) tiempo de vacío (TV; min) y tiempo de restauración (TR; min). El análisis demuestra que las mejores condiciones para la impregnación de polifenoles en

función de la variable FST en los factores de ESP, TV y TR son los que se muestran en el Cuadro 6.1.1. El análisis muestra que para ESP el nivel óptimo fue de 1.5 mm, para TV fue de 15 min y tiempo de restauración fue 5 min, con una predicción para los fenoles solubles totales de 11.476 mg EAG/g BS.

**Cuadro 6.1.1.** Respuestas predichas en el nivel actual de cada factor del modelo

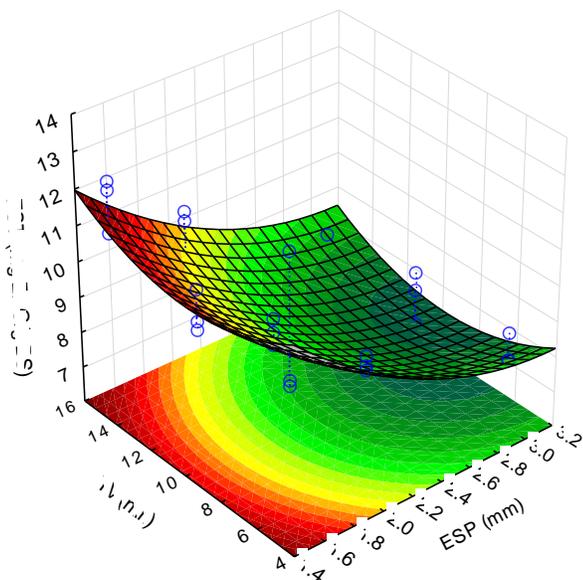
Nivel de ESP (mm)	Nivel de TV (min)	Nivel de TR (min)	Predicción de FST (mg EAG/g BS)	Valor de deseabilidad
1.5	15	5	11.476	0.699

ESP, espesor de rodaja; TV, tiempo de vacío; TR, tiempo de restauración; FST, fenoles solubles totales.

En la figura 6 se muestra el efecto que tienen las condiciones de impregnado al vacío sobre los valores de FST. En la figura 6A se observó un aumento de FST cuando se disminuye el valor del ESP y aumenta el TV; el TV tomó un efecto alto sobre la cantidad de FST cuando el ESP fue de 1.5 mm. En la figura 6B se aprecia un aumento de FST cuando, tanto el TR, como el ESP adquieren valores bajos. El efecto de TR hacia FST es mayor cuando ESP adquiere el valor de 1.5 mm. De igual manera, en la figura 6C, se muestra un aumento en FST cuando los niveles de TV son altos y los de TR son bajos (los tonos más rojizos en las gráficas significan mayor concentración de FST). Teniendo en cuenta todos los datos anteriormente analizados, una de las principales características que se busca es este tipo de modelos de optimización y predicción de respuestas es la validación de la adecuación (Azarpazhooh, Sharayei, y Ramaswamy, 2020), es decir, una relación aceptable entre los valores reales y los ajustados mediante el modelo de predicción. En ese sentido, los valores de  $R^2$  y  $R^2$  ajustada para el modelo fueron superiores a 0.7 (Ver Figura 6), lo que se considera como un buen modelo predictivo. El valor de la variable de respuesta que se predijo en este análisis fue 11.476 mg EAG/g BS (Cuadro 6.1.1), el cual se encuentra dentro de los 3 valores de los tratamientos que reportaron mayor de FST en el proceso de IV para la optimización de este (Cuadro 6.1).

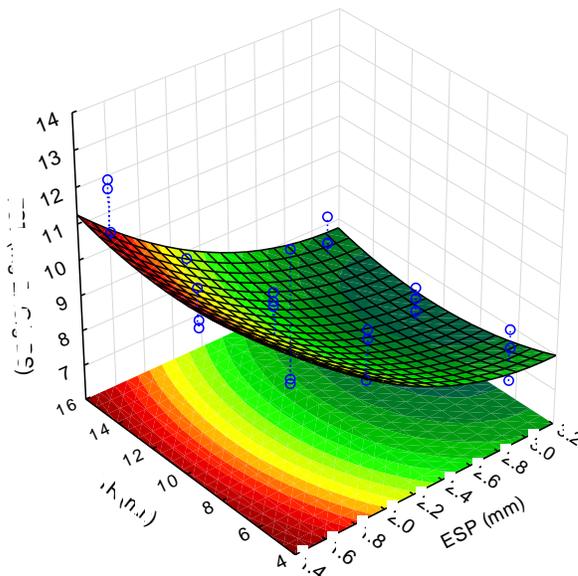
Esto indica que el valor predicho en el análisis estadístico para la variable de respuesta FST, coincide con los valores reales del experimento. En un estudio realizado con rodajas de manzanas, por Yilmaz y Ersus Bilek (2018), se muestra que existe un efecto significativo de los parámetros de tiempo de vacío y tiempo de restauración en un proceso de IV para la incorporación de compuestos utilizando matrices alimentarias porosas cortadas en rodajas; se demostró que al aumentar el TV y una presión de vacío óptima, o constante, la incorporación de compuestos fue mayor, lo cual coincide con este trabajo, ya que el nivel de TV que se determinó fue el alto. Esto se adjudica al hecho de que, en la etapa de vacío del proceso de impregnación, los capilares de la matriz se expanden y quedan listos para dar la entrada a la solución impregnadora, la cual contiene los compuestos de interés que se desean incorporar (Azarpazhooh y cols., 2020). Considerando esto, es posible que, para los tratamientos de jícama, al disminuir el nivel de ESP se propicie una mejor expansión de capilares y, por tanto, una mejor incorporación de compuestos. De igual manera, respecto a el TR, se sugiere que el nivel bajo de este parámetro es efectivo para dar entrada a la solución una vez que los capilares son expandidos, ya que la impregnación se lleva a cabo en la etapa de relajación (Yilmaz y Ersus Bilek, 2018). Es decir que, para llevar a cabo una eficiente incorporación de compuestos mediante IV se requiere expandir las estructuras capilares del alimento cortado con un nivel alto de TV, pero con niveles de ESP y TR bajos.

**A** R-sqr=0.772; R-Adj: 0.703



$$\text{FST (TR de 10min)} = 23.00 - 7.01 * (\text{ESP}) + 1.09 * (\text{ESP})^2 - 0.56 * (\text{TV}) + 0.029 * (\text{TV})^2 - 1.78$$

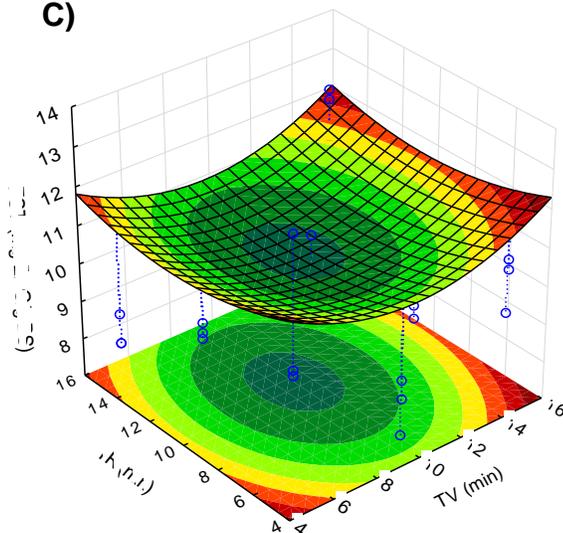
**B)** R-sqr=0.772; R-Adj: .703



$$\text{FST (TV de 15min)} = 23.00 - 7.01 * (\text{ESP}) + 1.09 * (\text{ESP})^2 - 0.33 * (\text{TR}) + 0.015 * (\text{TR})^2 - 2.745$$

R-sqr=0.772; R-Adj: 0.703

**C)**



$$\text{FST (ESP de 1.5mm)} = 23.008 - 0.566 * (\text{TV}) + 0.0291 * (\text{TV})^2 - 0.334 * (\text{TR}) + 0.0156 * (\text{TR})^2 - 8.048$$

**Figura 6.** Gráficos de superficie de repuesta para muestras de jícama impregnadas al vacío con extracto de semilla de mango (3 mg/mL). Efecto del tiempo de vacío y espesor (A), efecto del tiempo de restauración y espesor (B) y tiempo de vacío y tiempo de restauración (C), sobre el contenido de fenoles solubles totales. FST; Fenoles Solubles Totales. TR; Tiempo de restauración. TV; Tiempo de vacío. ESP; Espesor. Gráficos realizados y obtenidos de STATISTICA, StatSoft. Inc.

## **6.2 Cuantificación de fenoles solubles totales (FST), polifenoles hidrolizables (PH), ABTS, DPPH y FRAP.**

Se realizó la cuantificación de FST y PH en las muestras de jícama JI, TO y TA. De igual manera, se realizaron ensayos de capacidad antioxidante por ABTS, DPPH y FRAP a estas mismas muestras, para poder determinar la influencia del proceso de IV sobre el contenido de polifenoles y su capacidad antioxidante en la jícama, al compararla con muestras sin tratamiento e impregnada solo con agua. En todos los ensayos llevados a cabo (Cuadro 6.2) la muestra TO demostró tener mayor cantidad de FST y PH, así como la mayor capacidad antioxidante (ABTS, DPPH y FRAP) frente a las otras dos muestras ( $p < 0.05$ ). Respecto al contenido de FST, TO mostró contener, en promedio, 359% más contenido (11.76 mg EAG/g BS) respecto JI y TA (2.24 y 2.85 mg EAG/g BS respectivamente). En cuanto a PH, TO mostró ser el de mayor cantidad (12.66 mg EAG/g BS), sin embargo, en este ensayo, TO resultó ser estadísticamente igual que TA ( $p > 0.05$ ) y diferente que JI ( $p < 0.05$ ) (4.10 mg EAG/g BS). De mismo modo, en los ensayos de capacidad antioxidante, TO obtuvo notables resultados en contraste con JI y TA. Respecto al ensayo ABTS, TO fue 6.9 veces mayor que JI (129.99 vs 18.84 mmol ET/g BS); TA no registró actividad. En DPPH, TO fue 8.47 veces mayor que TA (20.26 vs 2.39 mmol ET/g BS); JI no demostró presencia de actividad antioxidante en este ensayo. En lo que respecta a FRAP, TO (64.52 mmol ET/ g BS) mostró ser 21.3 veces mayor que JI (3.03 mmol ET/ g BS) y 8 veces mayor que TA (8.06 mmol ET/ g BS). Como se mencionó anteriormente, la muestra de jícama TO, la cual corresponde al tratamiento de IV con extracto de semilla de mango (3 mg/mL), fue la que obtuvo mejores resultados en cuanto a contenido de FST y PH, al igual que la mayor capacidad antioxidante en los ensayos realizados; además de que, estos no solo fueron los resultados más altos, si no que estos se mostraron superiores a las muestras JI y TA; en la mayoría de los casos se mostró un incremento por arriba del 100% en los resultados. Se reportó, en un estudio realizado por Abalos, Naef, Aviles, y Gómez (2020) un incremento de FST del 473% en muestras de patatas impregnadas al vacío con un extracto comercial de polifenoles que contiene 95% de proantocianidinas oligoméricas, en comparación con una muestra control (patata sin tratamiento).

Estos resultados pueden ser comparables con los obtenidos en la cuantificación de FST (mg EAG/g muestra) de la muestra TO de este trabajo, donde se obtuvo un incremento respecto a la muestra JI (jícama sin tratamiento), de 425% de FST, utilizando extracto de semilla de mango (concentración 3mg/mL). El extracto de semilla de mango muestra un incremento de FST a través del proceso de impregnación al vacío similar al obtenido en el estudio por Abalos y cols. (2020), aun teniendo una concentración más baja de compuestos fenólicos que el utilizado por estos autores, evidenciando así, la eficacia de la optimización realizada para la impregnación al vacío de polifenoles en rodajas de jícamas. Este aumento de polifenoles en la jícama se puede atribuir a un mecanismo hidrodinámico efectuado por gradientes de presión, que consiste en el intercambio de un gas, o, en este caso, un líquido interno previamente ocluido a través de los poros abiertos de la matriz alimentaria por una fase líquida externa (Zhao y Xie, 2004). Por lo tanto, este proceso, el cual es el encargado de la incorporación de la solución líquida impregnadora con los compuestos de interés en la matriz alimentaria, está necesariamente influenciado por la porosidad, el tamaño, o en su defecto, el grosor de la muestra que será sometida a vacío, al igual que los tiempos de vacío y restauración y propiedades mecánicas y físicas del alimento utilizado (Hironaka, Oda, y Koaze, 2014). De igual forma, una vez impregnados los compuestos fenólicos a la matriz alimentaria, el aumento de la capacidad antioxidante de la muestra TO, en contraste de la muestra de jícama sin ningún tratamiento (JI), se relaciona con el contenido de polifenoles incorporados. Cruz-Trinidad y cols. (2019) reportaron la identificación de compuestos fenólicos presentes en la semilla de mango, tales como ácido gálico, ácido alágico, pentagalolil glucosa y mangiferina, mismos que presentan ser muy susceptibles a la oxidación, por lo tanto tienen un carácter marcadamente antioxidante, ya que experimentarán la oxidación antes que otras especies susceptibles, atribuyéndoles la capacidad eliminar los radicales libres y/o limitar su formación, previniendo la aparición y el desarrollo de enfermedades degenerativas en el organismo (Forbes-Hernandez y cols., 2016).

**Cuadro 6.2** Cuantificación de fenoles solubles totales (FST), polifenoles hidrolizables (PH), ABTS, DPPH, FRAP en los tratamientos de jícama<sup>1</sup>. (óptimo)

T	Análisis				
	FST (mg EAG/g BS)	PH (mg EAG/g BS)	ABTS (mmol ET/g BS)	DPPH (mmol ET/g BS)	FRAP (mmol ET/g BS)
Jl	2.24 ± 0.04 <sup>a</sup>	4.10 ± 0.12 <sup>a</sup>	18.84 ± 2.25 <sup>a</sup>	n.d.	3.03 ± 0.35 <sup>a</sup>
TO	11.76 ± 0.22 <sup>b</sup>	12.66 ± 1.12 <sup>b</sup>	129.99 ± 9.85 <sup>b</sup>	20.26 ± 1.17 <sup>a</sup>	64.52 ± 2.46 <sup>b</sup>
TA	2.85 ± 0.07 <sup>c</sup>	10.38 ± 0.47 <sup>b</sup>	n.d.	2.39 ± 0.06 <sup>b</sup>	8.06 ± 0.47 <sup>c</sup>

<sup>1</sup>Los resultados están expresados como la media ± desviación estándar (n=3). Las diferentes letras entre cada columna representan diferencias entre los tratamientos. T, tratamiento; Jl, jícama natural; TO, tratamiento óptimo; TA, tratamiento con agua; BS, base seca; n.d., no detectado.

### 6.3 Evaluación sensorial.

De acuerdo con las evaluaciones que realizaron los panelistas a las muestras de jícama, no se observó diferencia estadísticamente significativa ( $p > 0.05$ ) entre las muestras en cada rubro evaluado (Cuadro 6.2). El proceso de IV no parece afectar significativamente las características sensoriales de la jícama. En una investigación llevada a cabo por Blanda, G., et al., (2007) se realizó una evaluación sensorial de dos cultivos de manzana cortadas en rodajas e impregnadas al vacío con una solución acuosa (37.9% dextrosa, 15.2% sacarosa, 1.0% ácido ascórbico, 0.25% cloruro de calcio, 0.25% de sodio), en la cual el proceso de IV preserva las características sensoriales de sabor y textura; si bien en este mismo estudio se menciona que el dulzor aumentaba ligeramente en las muestras tratadas, esto pudo haberse debido a la adición de sacarosa a la formulación de la solución impregnadora. Radziejewska-Kubzdela y cols. (2014) mencionan que la modificación de las propiedades sensoriales de frutas y hortalizas mediante IV dependen en gran medida de la composición de la solución. En el caso en particular de este trabajo, la solución utilizada para impregnar las muestras de jícama contenía

solamente agua y extracto de polifenoles de semilla de mango asistido por ultrasonido, lo cual indica que, para este caso en particular, los polifenoles impregnados no modifican el perfil sensorial de la jícama.

**Cuadro 6.3** Resultados de evaluación sensorial en tratamientos de jícama<sup>1</sup>.

Muestra	Atributo sensorial			
	Color	Aroma	Sabor	Textura
Jl	8.5 ± 1.5 <sup>a</sup>	6.7 ± 2.2 <sup>a</sup>	8.0 ± 1.7 <sup>a</sup>	8.1 ± 1.5 <sup>a</sup>
TO	6.0 ± 2.1 <sup>a</sup>	6.1 ± 2.1 <sup>a</sup>	6.7 ± 2.5 <sup>a</sup>	7.5 ± 1.7 <sup>a</sup>
TA	7.2 ± 1.8 <sup>a</sup>	6.8 ± 2.3 <sup>a</sup>	7.5 ± 1.6 <sup>a</sup>	7.7 ± 1.7 <sup>a</sup>

<sup>1</sup>Los resultados están expresados como la media ± desviación estándar (n=3). Las diferentes letras entre cada columna representan diferencias entre los tratamientos. Los valores representan la media de cada evaluación según la escala hedónica 1 a 10 de la prueba. Jl, jícama natural; TO, tratamiento óptimo; TA, tratamiento con agua.

#### 6.4 Caracterización proximal.

Se realizó la caracterización proximal de las muestras Jl, TO y TA según la sección 5.2.3, de la cual se obtuvieron los resultados mostrados en el Cuadro 6.3. Se pudo observar que, respecto a la humedad, la muestra TO tiene el porcentaje más alto en comparación a las otras 2 muestras, con un valor de 88.87% (g/100g); las muestras Jl y TA muestran 3.27% y 0.37% menos que la muestra TO, respectivamente. Se percató que las muestras TO y TA presentaron un aumento de 3.6% en comparación con la muestra Jl. Estos resultados no coinciden con otros estudios donde se impregna una matriz alimentaria mediante IV, debido a que en otros trabajos similares se reporta una disminución de humedad asociada con la ganancia de sólidos solubles en la matriz alimentaria; lo cual indica que hay una interacción de la solución acuosa con el alimento distinta a otros procesos del mismo tipo, posiblemente asociada con las características fisicoquímicas de la matriz alimentaria, el tipo de solución impregnadora o las condiciones de impregnación (Zhao y Xie, 2003).

En cuanto al contenido de cenizas, se encontró una mayor cantidad de estas en la muestra TO (0.17 g/100g), conteniendo solo 0.03 y 0.05 g/100g más que las muestras JI y TA, respectivamente. Se observó un aumento de 21% (TO) y 14%(TA) respecto a la muestra JI. Joshi, Rupasinghe, y Pitts (2010) reportan resultados similares en el total de cenizas después del proceso de IV, los cuales indican un aumento de aproximadamente el 60% en muestras de rodajas de manzana impregnadas al vacío con una solución acuosa de vitaminas y minerales. Es posible atribuir el incremento de cenizas en una matriz alimentaria porosa, como la jícama, después de pasar por un proceso de IV a la transferencia de sólidos inorgánicos presentes en la solución impregnadora, los cuales son probables que se encuentren en esta al no estar purificada, y por acción de los gradientes de presión ejercidos durante el mismo proceso (Zhao y Xie, 2003).

Referente al contenido de carbohidratos totales (CT), la muestra que presentó mayor contenido de estos es JI, con 6.9 g/100g ( $p < 0.05$ ), mientras que las muestras TO y TA contienen 1.74 y 1.69 menos unidades que esta. Así mismo, el análisis proximal reportó que la muestra con el más alto contenido de fibra dietética total (FDT) fue JI (6.28 g/100g), siendo 1.58 y 1.21 g/100g mayor que TO y TA, respectivamente. Tanto en el contenido de CT y FDT se notó una disminución de, en promedio, un 24.8% (TO) y 19.26% (TA) respecto a la muestra de jícama sin tratamiento (JI). Actualmente no se ha encontrado algún estudio con un tratamiento y matriz alimentaria similar que haya presentado resultados semejantes a los de este trabajo en cuestión de disminución de CT y FDT. Sin embargo, Schulze, Hubbermann, y Schwarz (2014), describen en un estudio realizado con manzanas sometidas a procesos de presión, que en un proceso de IV, usando soluciones hipotónicas, propicia a una ruptura celular por hinchazón y al aumento de la turgencia celular, rompiendo y liberando diversas estructuras de la matriz porosa involucrada; suceso al cual es probable atribuir la menor cuantificación de CT y FDT en rodajas de jícama después del proceso de IV, lo cual puede ser verificado midiendo los cambios en la composición de la solución impregnadora después del impregnado.

En relación con el contenido de proteína y grasas, no se encontró una diferencia estadísticamente significativa entre las muestras ( $p > 0.05$ ), lo cual indica que el proceso de IV no afectó el contenido proteico y lipídico en la matriz de la jícama. Este suceso se podría adjudicar a que, tanto la jícama y la solución impregnadora carece que estos compuestos, y los mecanismos físicos llevados a cabo durante el proceso no modifican a las estructuras de este tipo.

**Cuadro 6.4** Caracterización proximal de los tratamientos de jícama<sup>1</sup>. (óptimo)

Componente (g/100g BH)	Tratamiento		
	JI	TO	TA
Humedad	85.60 ± 0.22 <sup>a</sup>	88.87 ± 0.11 <sup>b</sup>	88.50 ± 0.08 <sup>c</sup>
Cenizas	0.14 ± 0.01 <sup>a</sup>	0.17 ± 0.01 <sup>b</sup>	0.12 ± 0.01 <sup>c</sup>
Carbohidratos totales	6.9 ± 0.01 <sup>a</sup>	5.16 ± 0.01 <sup>b</sup>	5.21 ± 0.01 <sup>c</sup>
Proteína	0.86 ± 0.01 <sup>a</sup>	0.88 ± 0.01 <sup>a</sup>	0.88 ± 0.02 <sup>a</sup>
Fibra dietética total	6.28 ± 0.04 <sup>a</sup>	4.70 ± 0.07 <sup>b</sup>	5.07 ± 0.01 <sup>c</sup>
Fibra soluble	0.25 ± 0.04 <sup>a</sup>	0.23 ± 0.03 <sup>a</sup>	0.53 ± 0.05 <sup>b</sup>
Fibra insoluble	5.81 ± 0.1 <sup>a</sup>	4.27 ± 0.04 <sup>b</sup>	4.33 ± 0.05 <sup>b</sup>
Lignina	0.22 ± 0.01 <sup>a</sup>	0.19 ± 0.01 <sup>b</sup>	0.21 ± 0.01 <sup>ab</sup>
Grasas	0.22 ± 0.01 <sup>a</sup>	0.22 ± 0.01 <sup>a</sup>	0.22 ± 0.01 <sup>a</sup>

<sup>1</sup>Los resultados están expresados como la media ± desviación estándar (n=3). Las diferentes letras entre cada fila representan diferencias entre los tratamientos. JI, jícama natural; TO, tratamiento óptimo; TA, tratamiento con agua; BH, base húmeda.

### 6.5 Análisis de bioaccesibilidad *in vitro* y potencial habilidad de absorción de polifenoles.

Para poder evaluar la bioaccesibilidad y potencial absorción de polifenoles de las muestras de jícama, se realizó la cuantificación de Fenoles Solubles Totales (FST) y Polifenoles Hidrolizables (PH) en cada una de las etapas del modelo de digestión gastrointestinal *in vitro*, con lo cual fue posible estimar el contenido de Polifenoles Extraíbles y Polifenoles No Extraíbles (PNE) en dichas etapas, tal como se señala en la sección 5.2.6. Primeramente, en lo que respecta a la fracción intestinal (FI<sub>int</sub>),

se observó que el contenido PE fue mayor en la muestra impregnada con extracto de semilla de mango, o tratamiento óptimo, (TO), presentando 10.15 mg EAG/g BS, encontrando diferencia estadísticamente significativa entre las tres muestras ( $p < 0.05$ ). De igual manera, en esta fracción se cuantificaron los polifenoles que necesitaron de una hidrólisis ácida para ser liberados de la fracción, o PNE, de los cuales fueron mayoritarios en la muestra de jícama sin tratamiento (JI), siendo la muestra TO y la muestra de jícama impregnada con agua (TA) estadísticamente iguales entre sí, con 6.43 y 6.37 mg EAG/g BS respectivamente ( $p > 0.05$ ). Posteriormente, se lograron estimar los contenidos de PE en la Fracción Indigestible Soluble (FIS), dónde se pudo observar que la muestra TA, con 3.27 mg EAG/g BS, es estadísticamente igual ( $p > 0.05$ ) a las muestras JI y TO (3.07 y 3.57 mg EAG/g BS respectivamente), sin embargo, entre estas dos últimas muestras, si hubo diferencia estadísticamente significativa, siendo TO mayor a JI. Así mismo, se cuantificaron los PE y PNE de la Fracción Indigestible Insoluble (FII), dónde se observó qué, respecto a los PE, la muestra JI (4.25 mg EAG/g BS) mostró ser estadísticamente similar ( $p > 0.05$ ) a las muestras TO y TA, con 4.95 y 3.42 mg EAG/g BS respectivamente; en cambio, entre estas dos últimas muestras, se logró visualizar una diferencia estadística significativa ( $p < 0.05$ ), de las cuales, la muestra TO resultó ser mayor. De la misma manera, en lo que respecta al contenido de PNE en la FII, las tres muestras mostraron ser estadísticamente distintas entre sí ( $p < 0.05$ ), siendo TO la muestra que presentó mayor contenido de estos compuestos (7.26 mg EAG/g BS). Los resultados obtenidos sugieren que, al incorporar los polifenoles de un extracto de semilla de mango a rodajas de jícama mediante impregnación al vacío, existe un incremento de 21.26% de polifenoles solubles (PE) en la FIInt, al compararla con una muestra sin este tratamiento (JI), pero, al mismo tiempo este tratamiento disminuye un 19.62% la cantidad de PNE en la jícama. Así mismo, los resultados mostraron incrementar un 16.28% el contenido de PE en la FIS. También se logró observar que, según los resultados, el tratamiento de IV realizado logró aumentar el contenido de PNE un 27.81% respecto a una muestra sin ningún tratamiento (JI). De igual forma, se observó que, en la fracción indigestible insoluble (FII), la cual no es digerida en el intestino delgado, la muestra

de interés (TO), presentó un 46.6% más de liberación de polifenoles al ser hidrolizados con  $H_2SO_4$  (Polifenoles Hidrolizables), hecho el cual es posible atribuirse a las posibles interacciones de los compuestos bioactivos presentes en la solución impregnadora utilizada y las estructuras resistentes a la digestión intestinal, como la Fibra Dietética (FD), a través de un proceso de IV (Sauceda, Palafox, Sánchez, y Aguilar, 2011).

Una vez que se calculó el contenido de PE y PNE en la Flnt, FIS y FII de las muestras de jícama, se procedió a realizar el análisis de la bioaccesibilidad y el cálculo de la potencial absorción de polifenoles, cuantificados de acuerdo a las fórmulas descritas en la sección 5.2.6 de la metodología y cuyos resultados son mostrados en el Cuadro 6.5. Se estimó el contenido de Polifenoles Totales (PT) en las muestras de jícama, donde se pudo observar que la muestra JI, la cual reportó 16.37 mg EAG/g BS, no mostró diferencia estadísticamente significativa ( $p > 0.05$ ) respecto a la muestra TO, la cual reportó 16.59 mg EAG/g BS. Estas dos últimas muestras fueron diferentes estadísticamente ( $p < 0.05$ ) con la muestra TA en cuanto al contenido de PT, sin embargo, esta fue menor (13.70 mg EAG/g BS). En cuanto al contenido de Polifenoles No Biodisponibles (PNB), que son aquellos compuestos fenólicos que no absorbidos en el intestino delgado, y, además, son potenciales sustratos para la microbiota del colón al ser asociados a la fracción indigestible de la fibra dietética (FD) (Sauceda y cols., 2011), la muestra TO reportó mayor contenido de estos, con 15.79 mg EAG/g BS, mientras que las muestras JI y TA resultaron ser estadísticamente iguales ( $p > 0.05$ ), registrando una media de 13.02 y 12.04 mg EAG/g BS, respectivamente. Por otro lado, referente a los Polifenoles Potencialmente Disponibles para la Absorción (PPDPA, mg EAG/g BS), los cuales son aquellos liberados de la matriz del alimento en el tracto intestinal y que tienen el potencial de alcanzar una circulación sistemática (Tagliazucchi, Verzelloni, Bertolini, y Conte, 2010), la muestra que presentó mayor contenido de estos compuestos fue JI (3.35 mg EAG/g BS), siendo estadísticamente distinta ( $p < 0.05$ ) a las muestras TO y TA (0.79 y 1.66 mg EAG/g BS). Considerando los resultados anteriores se pudo calcular el porcentaje de potencial bioaccesibilidad (%BA), donde se indica el porcentaje de los compuestos que son liberados de la matriz

alimentaria después de la digestión, es decir, que son solubilizados para una potencial absorción intestinal. Dentro de los resultados de %BA, la muestra TO reportó el mayor porcentaje (61.21 %), difiriendo estadísticamente entre sí las tres muestras ( $p < 0.05$ ). Los porcentajes de bioaccesibilidad reportados indican que el tratamiento de impregnación al vacío de un extracto de semilla de mango en rodajas de jícama (TO), logró un incremento de aproximadamente 19.76% de la bioaccesibilidad de polifenoles, respecto a las muestras de rodajas de jícama fresca, o sin tratamiento (JI). En adición a esto, también fue calculada la potencial habilidad de absorción (%PHA), es decir, el porcentaje de los compuestos liberados de la matriz alimentaria en el intestino delgado, o bioaccesibles, que tienen la habilidad potencial de ser absorbidos en el intestino delgado, donde la muestras JI y TA registraron 20.46 y 12.05% de PHA, siendo estas iguales entre sí estadísticamente ( $p > 0.05$ ). También, la muestra TA, no reportó diferencia significativa ( $p > 0.05$ ) con la muestra TO, la cual reportó 4.78% de PHA. En una investigación realizada por Cruz-Trinidad y cols. (2019) se evaluó la bioaccesibilidad *in vitro* de barras de cereal con subproductos de mango, como harina de semilla de mango y cáscara de mango, dónde también se utilizó la misma metodología del modelo de digestión *in vitro* y el mismo modelo matemático para la estimación de la bioaccesibilidad de polifenoles. Los resultados de dicha investigación muestran un porcentaje de bioaccesibilidad de 58.5% y un contenido de PPDPA de 15.07 mg EAG/g en las formulaciones dónde se incorporaron ingredientes derivados de la semilla de mango. Este resultado es 4.36% menor que el %BA reportado de la muestra TO evaluada en el presente trabajo, sin embargo, la muestra de jícama impregnada con extracto de semilla de mango reportó ser 9 veces menor que la muestra evaluada en el estudio de Cruz-Trinidad y cols., respecto a la cantidad de PPDPA; si bien el %BA de la jícama impregnada al vacío se muestra mayor que el de las barras de cereal, la porción de PPDPA es mucho menor. Esto podría indicar que existe una menor liberación del total de polifenoles que están ligados a la matriz alimentaria de la jícama al momento de la digestión intestinal, sugiriendo que el proceso de IV liga los compuestos fenólicos a la matriz alimentaria de este alimento, de tal manera que no es posible que sean extraídos en su totalidad en el intestino delgado. En ese

sentido, al considerar una porción de 30g de jícama, la cual es una posible porción sugerida para este alimento en particular, y considerando la humedad de cada muestra, la cantidad de polifenoles potencialmente disponibles para la absorción (PPDPA30) en la muestra JI (14.38 mg/30g) fue mayor a las muestras TO y TA (2.66 y 5.80 mg/g respectivamente), mismas que no presentaron diferencias estadísticas significativas entre sí ( $p > 0.05$ ). De igual forma, la carga de polifenoles por porción fue mayoritaria en la muestra JI (2.96), siendo TO y TA (0.21 y 0.85) estadísticamente iguales entre sí ( $p > 0.05$ ).

Los resultados de este trabajo sugieren que la jícama es una matriz alimentaria óptima para la incorporación de polifenoles de un extracto de semilla de mango por impregnación al vacío, debido a que se observó un aumento en el contenido de PNB en las rodajas de jícama sometidas a dicho tratamiento, al igual que una disminución de la cantidad de polifenoles que son liberados de la matriz alimentaria, y qué, además son potenciales compuestos disponibles para la absorción, con el fin de alcanzar una circulación sistemática (PPDPA, %PHA y PPDPA30). Estos hechos pueden atribuirse al importante contenido de fibra dietética (FD) de la jícama. El USDA (United States Department of Agriculture) reportó en el año 2019 un contenido total de FD de 4.9 g/100g, polisacárido el cual, Espinosa-Andrews y cols., (2016) describen estar constituido por abundante fibra soluble como la oligofructosa y la inulina, misma que se forma a partir de enlaces  $\beta(1,2)$ -, los cuales son resistentes a las enzimas digestivas como la  $\alpha$ -glucosidasa y la  $\alpha$ -amilasa. En este aspecto, y debido a que se reportó una cantidad mayor de PNE en la FInt y FII por parte de las muestras sometidas a impregnación al vacío (TO y TA), los datos obtenidos podrían indicar que existe una posible interacción de los compuestos fenólicos impregnados, e incluso de los compuestos fenólicos intrínsecos de la jícama, con las fracciones indigestibles de esta misma, de tal manera que no son liberadas de la matriz del alimento por hidrólisis enzimática, y sirviendo como un potencial sustrato para la microbiota del colon y una potencial generación de metabolitos (Sauceda y cols., 2011).

**Cuadro 6.5** Análisis de bioaccesibilidad y potencial habilidad de absorción de polifenoles en muestras de jícama<sup>1</sup>. (óptimo)

	Tratamientos		
	JI	TO	TA
Contenido de polifenoles durante la digestión gastrointestinal <i>in vitro</i>			
Fracción Intestinal			
PE – FInt (mg EAG/g BS)	8.37 ± 0.31 <sup>a</sup>	10.15 ± 0.25 <sup>b</sup>	7.32 ± 0.19 <sup>c</sup>
PNE – FInt (mg EAG/g BS)	8.00 ± 0.30 <sup>a</sup>	6.43 ± 0.41 <sup>b</sup>	6.37 ± 0.15 <sup>b</sup>
Fracción Indigestible Soluble			
PE – FIS (mg EAG/g BS)	3.07 ± 0.13 <sup>a</sup>	3.57 ± 0.06 <sup>b</sup>	3.27 ± 0.23 <sup>ab</sup>
Fracción Indigestible Insoluble			
PE – FI (mg EAG/g BS)	4.25 ± 0.47 <sup>ab</sup>	4.95 ± 0.41 <sup>b</sup>	3.42 ± 0.57 <sup>a</sup>
PNE – FI (mg EAG/g BS)	5.68 ± 0.10 <sup>a</sup>	7.26 ± 0.25 <sup>b</sup>	5.33 ± 0.07 <sup>c</sup>
Bioaccesibilidad y potencial habilidad de absorción de polifenoles			
PT (mg EAG/g BS)	16.37 ± 0.62 <sup>a</sup>	16.59 ± 0.36 <sup>a</sup>	13.70 ± 0.34 <sup>b</sup>
PNB (mg EAG/g BS)	13.02 ± 0.46 <sup>a</sup>	15.79 ± 0.71 <sup>b</sup>	12.04 ± 0.74 <sup>a</sup>
PPDPA (mg EAG/g BS)	3.35 ± 0.36 <sup>a</sup>	0.79 ± 0.36 <sup>b</sup>	1.66 ± 0.97 <sup>b</sup>
Potencial Bioaccesibilidad (%)	51.11 ± 0.18 <sup>a</sup>	61.21 ± 1.88 <sup>b</sup>	53.48 ± 0.23 <sup>c</sup>
Potencial Habilidad de Absorción (%)	20.46 ± 1.79 <sup>a</sup>	4.78 ± 4.89 <sup>b</sup>	12.05 ± 6.96 <sup>ab</sup>
Contenido promedio de humedad (g/100g)	85.70	88.87	88.33
PPDPA por porción (mg/30g)	14.38 ± 1.67 <sup>a</sup>	2.66 ± .2.72 <sup>b</sup>	5.80 ± 3.39 <sup>b</sup>
Carga de polifenoles por porción	2.96 ± 0.59 <sup>a</sup>	0.21 ± 0.32 <sup>b</sup>	0.85 ± 0.67 <sup>b</sup>

<sup>1</sup>Los resultados están expresados como la media ± desviación estándar (n=3). Las diferentes letras entre cada fila representan diferencias entre los tratamientos. JI, jícama natural; TO, tratamiento óptimo; TA, tratamiento con agua; BS, base seca; EAG, equivalentes de ácido de gálico; PE, polifenoles extraíbles; PNE, polifenoles no extraíbles; Fint, fracción intestinal; FIS, fracción indigestible soluble, FII, fracción indigestible insoluble; PT, polifenoles totales; PNB, polifenoles no biodisponibles; PPDPA, polifenoles potencialmente disponibles para la absorción.

## 6.6. Capacidad antioxidante durante las etapas de digestión *in vitro*.

Al evaluar la capacidad antioxidante (CAOX) por los ensayos ABTS, DPPH y FRAP, de las muestras JI, TO y TA, durante las distintas etapas de la digestión gastrointestinal *in vitro* (Cuadro 6.6), se pudo observar que, en la fracción intestinal (Fint), la muestra TA reportó la mayor CAOX en los ensayos DPPH (12.175 mmol ET/g BS) y ABTS (134.68 mmol ET/g BS), siendo estadísticamente distinta a JI y TA en estos mismos ensayos ( $p < 0.05$ ). En el ensayo FRAP no hubo diferencia significativa entre las muestras ( $p > 0.05$ ). Respecto a la fracción indigestible insoluble (FII), la muestra TA siguió reportando la mayor CAOX para los tres ensayos realizados (DPPH; 4.187 mmol ET/g BS. ABTS; 15.278 mmol ET/g BS. FRAP; 4.927 mmol ET/g BS), mostrando diferencia estadística de las demás muestras en los tres ensayos. Sin embargo, todas las muestras indican un notable decremento de su CAOX en los ensayos DPPH y ABTS respecto a la Fint. En el ensayo FRAP la muestra JI si registra CAOX (2.718 mmol ET/g BS) y TO continuó sin reportar actividad. Referente a la fracción indigestible soluble (FIS), todas las muestras demostraron ser “no detectables” (ND) al realizar el ensayo ABTS. En esta misma fracción, se observó que todas muestras fueron estadísticamente iguales entre sí en el ensayo DPPH, y en cuanto a FRAP, la muestra que registró mayor CAOX fue TA, con 6.864 mmol ET/g BS. Los resultados de la CAOX evaluada de las diferentes muestras en las fracciones de la digestión gastrointestinal *in vitro*, sugieren que no existe una mayor capacidad antioxidante por parte de la jícama impregnada al vacío con polifenoles de extracto de semilla de mango (TO), en comparación con las muestras JI y TA, por ninguno de los métodos empleados. El hecho de que la capacidad antioxidante de la muestra impregnada con extracto de semilla de mango haya disminuido después de haberse sometido a un proceso de digestión gastrointestinal *in vitro*, y considerando el abundante contenido de fibra indigestible en las muestras, se puede atribuir a que el proceso de IV puede generar posibles interacciones entre los compuestos fenólicos (por ejemplo, enlaces o-glucosídicos entre los hidroxilos característicos tanto de fibra indigestible, así como en compuestos fenólicos) del extracto de semilla de mango y los polisacáridos presentes en esta fracción; de tal manera que estas interacciones no permitan la

total extracción de dichos compuestos y se impida llevar a cabo su capacidad para neutralizar radicales libres.

**Cuadro 6.6** Capacidad antioxidante *in vitro* durante las etapas de digestión gastrointestinal en muestra de jícama.

Etapa	Capacidad antioxidante	JI	TO	TA
Fint	DPPH (mmol eT/g-bs)	5.909 ± 0.65 <sup>a</sup>	6.227 ± 0.80 <sup>a</sup>	12.175 ± 0.98 <sup>b</sup>
	ABTS (mmol eT/g-bs)	113.041 ± 4.38 <sup>a</sup>	113.686 ± 3.53 <sup>a</sup>	134.687 ± 4.54 <sup>b</sup>
	FRAP (mmol eT/g-bs)	16.049 ± 1.46 <sup>a</sup>	16.049 ± 1.46 <sup>a</sup>	16.049 ± 1.46 <sup>a</sup>
FII	DPPH (mmol eT/g-bs)	2.00 ± 0.38 <sup>a</sup>	1.370 ± 0.68 <sup>a</sup>	4.187 ± 0.68 <sup>b</sup>
	ABTS (mmol eT/g-bs)	12.602 ± 0.39 <sup>a</sup>	8.759 ± 0.46 <sup>b</sup>	15.278 ± 0.657 <sup>c</sup>
	FRAP (mmol eT/g-bs)	2.718 ± 0.27 <sup>a</sup>	ND	4.927 ± 0.62 <sup>b</sup>
FIS	DPPH (mmol eT/g-bs)	6.38 ± 0.42 <sup>a</sup>	6.573 ± 0.244 <sup>a</sup>	6.433 ± 0.24 <sup>a</sup>
	ABTS (mmol eT/g-bs)	ND	ND	ND
	FRAP (mmol eT/g-bs)	3.483 ± 0.25 <sup>a</sup>	4.483 ± 0.43 <sup>b</sup>	6.864 ± 0.21 <sup>c</sup>

Los valores son la media de n=3 observaciones. Letras distintas en la columna, indican diferencia significativa entre los niveles de tipo de muestra. <sup>1</sup>eAG: equivalente ácido gálico. <sup>2</sup>eT: equivalente Trolox. <sup>3</sup>g-bs: gramos en base seca. FII: Fracción indigestible insoluble. FInt: Fracción intestinal. FIS: Fracción indigestible soluble. JI; jícama fresca. To; tratamiento óptimo. TA; tratamiento con agua. ND; no detectable.

## **CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES**

Se concluye que, un espesor de jícama de 1.5 mm, un tiempo de vacío de 15 minutos y un tiempo de restauración de 5 minutos fueron las condiciones óptimas para una mayor impregnación de polifenoles, tras realizar la optimización del proceso de impregnación al vacío de un extracto de semilla de mango (concentración 3 mg/mL). Siendo que, al llevar a cabo la impregnación al vacío con este extracto en dicho alimento, a las condiciones óptimas determinadas, se incrementó significativamente el contenido de fenoles solubles totales, polifenoles hidrolizables y capacidad antioxidante (DPPH, ABTS y FRAP), en comparación a la jícama fresca, o sin tratamiento.

El proceso de impregnación al vacío no modificó el perfil sensorial de la jícama al ser impregnada con el extracto utilizado. Sin embargo, este mismo proceso afectó el contenido de humedad, cenizas, carbohidratos totales y fibra dietética total, mientras que el contenido de grasas totales y proteína se mantuvo.

De igual manera, se concluye que la incorporación de polifenoles de extracto de semilla de mango en rodajas de jícama mediante impregnación al vacío, aumentó el porcentaje de bioaccesibilidad de estos compuestos, pero disminuyó el porcentaje de la potencial habilidad de absorción y la carga de polifenoles disponibles para la absorción en una porción sugerida de 30 g del alimento.

## CAPÍTULO 8. REFERENCIAS

- Abalos, R. A., Naef, E. F., Aviles, M. V., y Gómez, M. B. J. L. (2020). Vacuum impregnation: A methodology for the preparation of a ready-to-eat sweet potato enriched in polyphenols. *131*, 109773.
- Akman Perihan K, Uysal E., Ozkaya Gulsum U, Fatih Tornuk, y Durak M. Zeki. (2019). Development of probiotic carrier dried apples for consumption as snack food with the impregnation of *Lactobacillus paracasei*. *LWT - Food Science and Technology*, *103*.
- Alanon, M. E., Pimentel-Moral, S., Arraez-Roman, D., y Segura-Carretero, A. (2021). HPLC-DAD-Q-ToF-MS profiling of phenolic compounds from mango (*Mangifera indica* L.) seed kernel of different cultivars and maturation stages as a preliminary approach to determine functional and nutraceutical value. *Food Chemistry*, *337*, 127764. doi:10.1016/j.foodchem.2020.127764
- Álvarez-Parrilla Emilio, De la Rosa Laura A, Ryszard Amarowicz§, y Fereidoon, S. (2011). Antioxidant Activity of Fresh and Processed Jalapeño and Serrano Peppers. *Journal Agric. Food Chem.*, *59*. doi:10.1021/jf103434u
- Method 991.42 & 993.19. Official methods of analysis 16 C.F.R. (1995).
- Method 991.42 & 993.19. Official methods of analysis., (2000).
- Aquino-Bolaños, E. N., y Mercado-Silva, E. (2004). Effects of polyphenol oxidase and peroxidase activity, phenolics and lignin content on the browning of cut jicama. *Postharvest Biology and Technology*, *33*(3), 275-283. doi:10.1016/j.postharvbio.2004.03.009
- Azarpazhooh, E., Sharayei, P., y Ramaswamy, H. S. (2020). Optimization of ultrasound-assisted osmotic treatment of *Aleo vera* gel impregnated with grape pomace phenolic compounds using response surface methodology. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*(22(3), 202-212.).
- Batista de Medeiros, R., Vieira da Silva Júnior, E., Fernandes da Silva, J., da Cunha Ferreira Neto, O., Rupert Brandão, S., Pimenta Barros, Z., y Azoubel, P. (2019). Efecto de diferentes técnicas de impregnación de polifenoles de residuos de uva en mango. *Revista de ingeniería de alimentos* . 262.

- Benzie Iris F.F., y Strain, J. J. (1996). The Ferric Reducing Ability of Plasma (FRAP) as a Measure of "Antioxidant Power": The FRAP Assay. *Analytical Biochemistry*, 239(1), 70 - 76
- Betalleluz Pallardel, I. M. (2016). *Estudio del enriquecimiento de manzana con prebióticos, probióticos y componentes antioxidantes provenientes de zumo de mandarina por impregnación a vacío para el desarrollo de aperitivos altamente funcionales y con bajo contenido calórico*. Universitat Politècnica de València,
- Betoret, E., Sentandreu, E., Betoret, N., Codoñer-Franch, P., Valls-Bellés, V., y Fito, P. (2012). Technological development and functional properties of an apple snack rich in flavonoid from mandarin juice. *Innovative Food Science Emerging Technologies*, 16, 298-304.
- Blancas-Benitez, F. J., Mercado-Mercado, G., Quirós-Sauceda, A. E., Montalvo-González, E., González-Aguilar, G. A., Sáyago-Ayerdi, S. G. J. F., y function. (2015). Bioaccessibility of polyphenols associated with dietary fiber and in vitro kinetics release of polyphenols in Mexican 'Ataulfo'mango (*Mangifera indica* L.) by-products. 6(3), 859-868.
- Castagnini, J. M., Betoret, N., Betoret, E., y Fito, P. (2015). Vacuum impregnation and air drying temperature effect on individual anthocyanins and antiradical capacity of blueberry juice included into an apple matrix. *LWT - Food Science and Technology*, 64(2), 1289-1296. doi:10.1016/j.lwt.2015.06.044
- Castañeda-Garza, M. E. (2000). Utilización de jícama (*Pachyrhizus erosus* L. Urban) en la elaboración de pan blanco para favorecer su calidad nutricia.
- Castro-Ramirez, J. (2010). *Cuantificación de Almidón en Diez Especies Vegetales*. UAAAN,
- Chiralt, A., Fito, P., Andrés, A., Barat, J., Martínez-Monzo, J., y Martínez-Navarrete, N. (1999). *Impregnación al vacío: una herramienta en el procesamiento mínimo de alimentos*. *Procesamiento de alimentos: Optimización de la calidad y evaluación de procesos*.
- Clevidence Beverly , Paetau Inke , y Smith, J. C. J. (2000). Bioavailability of Carotenoids from Vegetables. *HORT SCIENCE*, 35.

- Cruz-Trinidad, B., Sánchez-Burgos, J. A., Tovar, J., Sáyago-Ayerdi, S. G., y Zamora-Gasga, V. M. (2019). In vitro gastrointestinal digestion of mango by-product snacks: Potential absorption of polyphenols and antioxidant capacity. *International Journal of Food Science & Technology*, 54(11), 3091-3098. doi:10.1111/ijfs.14224
- Duarte-Correa, Y., Granda-Restrepo, D., Cortes, M., y Vega-Castro, O. (2020). Potato snacks added with active components: effects of the vacuum impregnation and drying processes. *J Food Sci Technol*, 57(4), 1523-1534. doi:10.1007/s13197-019-04188-5
- Echeverría, M. (2020). Alimentos funcionales ganan terreno en mercado mexicano. *The Food Tech*.
- Espinosa-Andrews, Rogelio Rodriguez-Rodriguez, Eristeo Marquez-Garcia, Jorge Alberto Garcia-Fajardo, Lilia Guadalupe Martinez-Torres, Elida Martinez-Gastelum, Maria de los Angeles Sanchez-Contreras, Neith Aracely Lopez-Pacheco, Teresa del Rosario Ayora-Talavera, y Herrera-Castillo, G. (2016). Los compuestos bioactivos y tecnologías de extracción.
- Fito, P., Amparo Chiralt, José M Barat, Ana Andrés, Javier Martínez-Monzó, y Martínez-Navarrete, N. (2001). Vacuum impregnation (VI) of structured foods implies the partial release of gas from pores and its substitution by an external liquid. *Journal of Food Engineering*, 49(4). doi://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00226-0
- Forbes-Hernandez, T. Y., Gasparri, M., Afrin, S., Bompadre, S., Mezzetti, B., Quiles, J. L., Giampieri, F., y Battino, M. (2016). The Healthy Effects of Strawberry Polyphenols: Which Strategy behind Antioxidant Capacity? *Crit Rev Food Sci Nutr*, 56 Suppl 1, S46-59. doi:10.1080/10408398.2015.1051919
- Gimeno-Creus, E. (2004). Compuestos fenólicos. Un análisis de sus beneficios para la salud *OFFARM*.
- Gomez-Caravaca, A. M., Lopez-Cobo, A., Verardo, V., Segura-Carretero, A., y Fernandez-Gutierrez, A. (2016). HPLC-DAD-q-TOF-MS as a powerful platform for the determination of phenolic and other polar compounds in the

- edible part of mango and its by-products (peel, seed, and seed husk). *Electrophoresis*, 37(7-8), 1072-1084. doi:10.1002/elps.201500439
- Hartzfeld Pablo W., Forkner Rebeca , Cazador Marca D., y E., H. A. (2002). Determination of Hydrolyzable Tannins (Gallotannins and Ellagitannins) after Reaction with Potassium Iodate. *J. Agric. Food Chem*, 50. doi:10.1021/jf0111155
- Heredia Gutiérrez, A. B., Asensio Grau, A., Calvo Lerma, J., y Andrés Grau, A. M. (2021). Simulación in vitro de la digestión gastrointestinal de alimentos.
- Hironaka, K., Oda, Y., y Koaze, H. (2014). Iron enrichment of whole potato tuber by vacuum impregnation. *LWT-Food Science Technology*, 59(1), 504-509.
- Jahurul, M. H., Zaidul, I. S., Ghafoor, K., Al-Juhaimi, F. Y., Nyam, K. L., Norulaini, N. A., Sahena, F., y Mohd Omar, A. K. (2015). Mango (*Mangifera indica* L.) by-products and their valuable components: a review. *Food Chem*, 183, 173-180. doi:10.1016/j.foodchem.2015.03.046
- Jaiswal, V., Chauhan, S., y Lee, H. J. (2021). The Bioactivity and Phytochemicals of *Pachyrhizus erosus* (L.) Urb.: A Multifunctional Underutilized Crop Plant. *Antioxidants (Basel)*, 11(1). doi:10.3390/antiox11010058
- Joshi, A. P. K., Rupasinghe, H. P. V., y Pitts, N. L. (2010). Sensory and Nutritional Quality of the Apple Snacks Prepared by Vacuum Impregnation Process. *Journal of Food Quality*, 33(6), 758-767. doi:10.1111/j.1745-4557.2010.00349.x
- Kumar, M., Saurabh, V., Tomar, M., Hasan, M., Changan, S., Sasi, M., Maheshwari, C., Prajapati, U., Singh, S., y Prajapat, R. K. (2021). Mango (*Mangifera indica* L.) leaves: Nutritional composition, phytochemical profile, and health-promoting bioactivities. *Journal Antioxidants*, 10(2), 299.
- Li, B. W., Andrews, K. W., y Pehrsson, P. R. (2002). Individual Sugars, Soluble, and Insoluble Dietary Fiber Contents of 70 High Consumption Foods. *Journal of Food Composition and Analysis*, 15(6), 715-723. doi:10.1006/jfca.2002.1096
- Mercado-Mercado, G., Montalvo-González, E., González-Aguilar, G. A., Alvarez-Parrilla, E., y Sáyago-Ayerdi, S. G. (2018). Ultrasound-assisted extraction of carotenoids from mango (*Mangifera indica* L. 'Ataulfo') by-products on in vitro

- bioaccessibility. *Food Bioscience*, 21, 125-131.  
doi:10.1016/j.fbio.2017.12.012
- Montreau, F. (1972). Sur le dosage des composés phénoliques totaux dans les vins par la méthode Folin-Ciocalteu. *OENO One*, 6(4), 397-404.
- Okino-Delgado, C. H., y Fleuri, L. F. (2015). Orange and mango by-products: Agro-industrial waste as source of bioactive compounds and botanical versus commercial description—A review. *Food Reviews International*, 32(1), 1-14.  
doi:10.1080/87559129.2015.1041183
- Prior, R. L., Wu, X., y Schaich, K. (2005). Standardized methods for the determination of antioxidant capacity and phenolics in foods and dietary supplements. *Journal of Agricultural Food Chemistry*, 53(10), 4290-4302.
- Radziejewska-Kubzdela, E., Bieganska-Marecik, R., y Kidon, M. (2014). Applicability of vacuum impregnation to modify physico-chemical, sensory and nutritive characteristics of plant origin products--a review. *Int J Mol Sci*, 15(9), 16577-16610. doi:10.3390/ijms150916577
- Re Roberta , Nicoletta Pellegrini, Anna Proteggente, Ananth Pannala, Min Yang, y Catherine Rice-Evans. (1999). Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free Radical Biology and Medicine*, 26( 9–10). doi:10.1016/S0891-5849(98)00315-3
- Rodríguez-Roque, M. J., de Ancos, B., Sánchez-Moreno, C., Cano, M. P., Elez-Martínez, P., y Martín-Belloso, O. (2015). Impact of food matrix and processing on the in vitro bioaccessibility of vitamin C, phenolic compounds, and hydrophilic antioxidant activity from fruit juice-based beverages. *Journal of Functional Foods*, 14, 33-43. doi:10.1016/j.jff.2015.01.020
- SADR, S. d. A. y. D. R. (2015). Nayarit entre los principales productores de mango, jícama y caña. Retrieved from [www.gob.mx/agricultura%7Cnayarit](http://www.gob.mx/agricultura%7Cnayarit)
- SADR, S. d. A. y. D. R. (2019). Jícama, una raíz muy jugosa. Retrieved from [www.gob.mx/agricultura/articulos/jicama](http://www.gob.mx/agricultura/articulos/jicama)
- SADR, S. d. A. y. D. R. (2020). El mango, producto estrella en México. Retrieved from [www.gob.mx/agricultura](http://www.gob.mx/agricultura)

- Sauceda, A. E. Q., Palafox, H., Sánchez, R. M. R., y Aguilar, G. A. G. J. B. (2011). Interacción de compuestos fenólicos y fibra dietaria: capacidad antioxidante y biodisponibilidad. *13*(3), 3-11.
- Saura-Calixto Fulgencio , García-Alonso Alejandra , Goñilsabel , y BravoLaura. (2000). In Vitro Determination of the Indigestible Fraction in Foods: An Alternative to Dietary Fiber Analysis. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *48*. doi:10.1021/jf0000373
- Schulze, B., Hubbermann, E. M., y Schwarz, K. (2014). Stability of quercetin derivatives in vacuum impregnated apple slices after drying (microwave vacuum drying, air drying, freeze drying) and storage. *LWT - Food Science and Technology*, *57*(1), 426-433. doi:10.1016/j.lwt.2013.11.021
- SIAP, S. d. I. A. y. P. (2018). Jícama: dulce, jugosa y muy nutritiva. Retrieved from [www.gob.mx/siap/articulos/jicama-dulce-jugosa-y-muy-nutritiva?idiom=es](http://www.gob.mx/siap/articulos/jicama-dulce-jugosa-y-muy-nutritiva?idiom=es)
- Siller-Sánchez, A., Alvarez-Pérez, O. B., Aguilar, C. N., y Rojas, R. (2013). Polifenoles de Cáscara de mango (*Mangifera caesia* var. Ataulfo): Una Alternativa Antioxidante y Antimicrobiana Antioxidante y Antimicrobiana polyphenols from mango peels (*Mangifera Mangifera caesia* var. Ataulfo): an antioxidant: an antioxidant and antimicrobial alternative and antimicrobial alternative. *Revista Científica de la Universidad Autónoma de Coahuila*, *5*(10).
- Sorensen, M. (1996). *Yam bean. Pachyrhizus DC.* (l. e. IPGRI Ed.). Roma, Italia.
- Sumaya-Martínez, M. T., Medina-Carrillo, R. E., González-Ocegueda, E., Jiménez-Ruiz, E. I., Balois-Morales, R., Sánchez-Herrera, L. M., y López-Nahuatt, G. (2019). Mango (*Mangifera indica* L.) pulping byproducts: Antioxidant activity and bioactive compounds of three mango cultivars %J Revista bio ciencias. *6*.
- Tagliacuzzi, D., Verzelloni, E., Bertolini, D., y Conte, A. (2010). In vitro bio-accessibility and antioxidant activity of grape polyphenols. *Food Chemistry*, *120*(2), 599-606. doi:10.1016/j.foodchem.2009.10.030
- USDA, N. N. D. B. (2019). FoodData Central. Retrieved from [fdc.nal.usda.gov/fdc-app.html#/food-details/170073/nutrients](https://fdc.nal.usda.gov/fdc-app.html#/food-details/170073/nutrients)

- Valenzuela B, A., y Maiz G, A. (2006). EL ROL DE LA FIBRA DIETÉTICA EN LA NUTRICION ENTERAL *Revista chilena de nutrición*, 33, 342-311.
- Velderrain-Rodríguez, G., QuirÓS-Sauceda, A., Mercado-Mercado, G., Ayala-Zavala, J. F., AstiazarÁN-GarcÍA, H., Robles-Sánchez, R. M., Wall-Medrano, A., Sayago-Ayerdi, S., y GonzÁLez-Aguilar, G. A. (2016). Effect of dietary fiber on the bioaccessibility of phenolic compounds of mango, papaya and pineapple fruits by an in vitro digestion model. *Food Science and Technology*, 36(2), 188-194. doi:10.1590/1678-457x.6729
- Wall-Medrano, A., Olivas-Aguirre, F. J., Ayala-Zavala, J. F., Domínguez-Avila, J. A., Gonzalez-Aguilar, G. A., Herrera-Cazares, L. A., y Gaytan-Martinez, M. (2020). Health Benefits of Mango By-products. *Food Wastes and By-products*. doi:doi.org/10.1002/9781119534167.ch6
- Yilmaz, F. M., y Ersus Bilek, S. (2018). Ultrasound-assisted vacuum impregnation on the fortification of fresh-cut apple with calcium and black carrot phenolics. *Ultrason Sonochem*, 48, 509-516. doi:10.1016/j.ultsonch.2018.07.007
- Zhao, y Xie, J. (2003). Nutritional enrichment of fresh apple (Royal Gala) by vacuum impregnation. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*(54:5, 387-398). doi:10.1080/09637480310001595261
- Zhao, y Xie, J. (2004). Practical applications of vacuum impregnation in fruit and vegetable processing. *Trends in Food Science & Technology*, 15(9), 434-451. doi:10.1016/j.tifs.2004.01.008



**Evaluación Sensorial: C - 589**

Género: Masculino

Femenino

Edad:

Fecha de evaluación:

Instrucciones: A continuación, se presenta una lista de términos para describir las características sensoriales de rodajas de jícama. Por favor, indique su percepción para cada atributo marcando con una línea vertical en cualquier punto de la escala Me disgusta, ni me gusta ni me disgusta y me gusta mucho.

<b>Color</b>	----- -----
<b>Aroma</b>	----- -----
<b>Sabor</b>	----- -----
<b>Textura</b>	----- -----

Me disgusta  
mucho

Ni me gusta ni me disgusta

Me gusta mucho

**Comentarios:** \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

