



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO**

**INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA SALUD**

**LICENCIATURA EN NUTRICIÓN**

**TESIS**

**COMPARACIÓN DE TERMOSONICACIÓN Y PASTEURIZACIÓN EN LA  
PRODUCCIÓN DE UNA SOPA CREMA A BASE DE BETABEL (*BETA  
VULGARIS L.*) SOBRE LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS,  
FUNCIONALES Y ANTIOXIDANTES**

**Para obtener el título de  
Licenciada en Nutrición**

**PRESENTA**

**P.L.N. Vania Ivonne Bautista Pacheco**

**Directora:**

**Dra. Nelly del Socorro Cruz Cansino**

**Codirectora:**

**Dra. Quinatzin Yadira Zafra Rojas**

**Comité tutorial:**

**Dra. Esther Ramírez Moreno**

**Dr. Luis Delgado Olivares**

**San Agustín Tlaxiaca, Hgo., México., Septiembre 2024**



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO  
INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA SALUD  
ÁREA ACADÉMICA DE NUTRICIÓN



De acuerdo con el artículo 40 y 43 del Reglamento de Titulación vigente, el jurado de examen recepcional designado, autoriza para su impresión el trabajo de la Tesis titulada:

**"COMPARACIÓN DE TERMOSONICACIÓN Y PASTEURIZACIÓN EN LA PRODUCCIÓN DE UNA SOPA CREMA A BASE DE BETABEL (*BETA VULGARIS* L.) SOBRE LAS PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS, FUNCIONALES Y ANTIOXIDANTES"**

Que para obtener el Título de Licenciada de Nutrición en la modalidad "Elaboración de tesis mediante examen recepcional" sustenta la Pasante

**C. Vania Ivonne Bautista Pacheco.**

**A T E N T A M E N T E**

**Pachuca de Soto, Hidalgo, 19 de septiembre de 2024**  
**"Amor, Orden y Progreso"**

|               |                                     |
|---------------|-------------------------------------|
| PRESIDENTE:   | DR. LUIS DELGADO OLIVARES           |
| SECRETARIO:   | DRA. NELLY DEL SOCORRO CRUZ CANSINO |
| PRIMER VOCAL: | DRA. QUINATZIN YADIRA ZAFRA ROJAS   |
| SUPLENTE      | DRA. ESTHER RAMÍREZ MORENO          |

## **Agradecimientos**

A mí todo; el dador de sabiduría, fuerza, valentía, paciencia y más. Mi Dios, quien me acompaña en cada etapa de mi vida, que nunca me abandona y en este trayecto que se tornaba tan complejo en ocasiones, me brindaba paz y me recordaba que en ÉL encuentro fortaleza para seguir.

A mi papá y hermano, que cada día me dejaban e iban por mí a la parada del autobús, porque aunque mi hermano no entendía mucho cuando le hablaba sobre mi proyecto, me apoyó en cada momento y me alentaba a seguir.

A mi mami, que en cada momento ha estado conmigo para darme la seguridad de que alguien confía en mí con los ojos cerrados y recordarme que yo también puedo y debo hacerlo, por el apoyo incondicional y la comida calentita que cada día tenía en la mesa cuando llegaba tarde del laboratorio y por mantener las batas tan blancas cuando las manchaba con betabel o alguna otra sustancia que me era casi imposible desprender.

A mis tíos, Jesús, Eva y Estela, que me alojaron en su casa para poder continuar con mi proyecto y me aportaron tantos consejos. También a mis primos (Laura, Jesús y Guillermo) por su hospitalidad. Gracias por interesarse en mi proyecto, hacerme sentir tan querida, cuidada y motivada.

A mi gata Canis, que me acompañó cada madrugada, quien me recibe cada día y apacigua mis momentos complicados con sus ronroneos.

Quiero agradecer a mis directoras; la doctora Nelly y la doctora Quina, quienes me apoyaron en cada momento con diversas palabras de aliento, se quedaban hasta tarde conmigo cuando hacía mí experimental, me aportaron sus conocimientos y experiencia; se preocupaban por mí cada día. Gracias por tanto, porque además de ser grandes docentes, son personas maravillosas, les guardo un cariño muy grande. Al Dr. Luis y al Dr. Alanís, quienes me brindaron mucho conocimiento y mediante su experiencia, paciencia y motivación pude desarrollar mejor mi proyecto. A la Dra. Esther; gracias por su dedicación, paciencia y por los consejos dados.

Muchas gracias a mis amigas y compañeras de laboratorio: Vania, Ara, Naza, Glo, Lili, Mine, Dan, Kim, Wen y Lis, que me apoyaron de muchas formas y siempre hicieron más amena la estancia en el laboratorio, por las risas, la compañía y la amistad formada fuera del laboratorio también. Las llevo siempre en mi corazón.

Gracias a mi psicóloga Lupita, por darme herramientas suficientes y apoyo en esta montaña rusa con tantas vueltas, subidas y bajadas.

Finalmente, gracias a mis amigos: Juan, Naty, Laura, Prissy, Andrea, Aaron, Naty Aguilar y Magali; quienes estuvieron conmigo escuchándome en cada oportunidad, gracias por motivarme, darme ideas pese a que algunos somos de áreas totalmente distintas, gracias infinitas por acompañarme en mis momentos más difíciles y compartir mis logros. Agradezco a Dios por brindarme una red de apoyo tan linda, están en mi corazón.

## **Dedicatorias**

A Dios, por ser mi maestro de vida y amarme tanto.

A mis padres y abuelas, por enseñarme que ser perseverante y hacer las cosas con amor, es esencial.

A mi hermano, por enseñarme a ser valiente y resiliente.

A Naty, por ser mi mejor amiga, por confiar en mí y acompañarme en cada etapa de mi vida.

A Laura, por enseñarme la lucha constante que se requiere para conseguir tus sueños.

A Juan, por enseñarme que la sensibilidad y la fortaleza no están peleadas. Se complementan.

“Caminando en línea recta  
no puede uno llegar muy lejos”

El principito. Antoine de Saint-Exupéry

## Índice general

|                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------|----|
| Índice de figuras                                                  | 7  |
| Índice de tablas                                                   | 8  |
| Abreviaturas                                                       | 9  |
| Unidades de medida                                                 | 10 |
| 1. Resumen                                                         | 11 |
| 2. Abstract                                                        | 12 |
| 3. Marco teórico                                                   | 13 |
| 3.1 Betabel                                                        | 13 |
| 3.2 Producción a nivel mundial y nacional                          | 13 |
| 3.3 Composición nutricional                                        | 14 |
| 3.3.1 Betalaínas                                                   | 16 |
| 3.3.2 Compuestos fenólicos                                         | 17 |
| 3.3.3 Flavonoides                                                  | 17 |
| 3.3.4 Carotenoides                                                 | 18 |
| 3.3.5 Fibra dietética                                              | 18 |
| 3.4 Compuestos bioactivos del betabel y su importancia en la salud | 18 |
| 3.5 Formas de consumo y utilización a nivel industrial             | 19 |
| 3.5.1 Jugo de betabel                                              | 20 |
| 3.5.2 Sopas instantáneas                                           | 20 |
| 3.5.3 Sopa crema                                                   | 21 |
| 3.6 Pasteurización                                                 | 21 |
| 3.7 Ultrasonido                                                    | 22 |
| 3.8 Termoultrasonido                                               | 23 |
| 4. Problema de investigación                                       | 25 |
| 5. Justificación                                                   | 26 |
| 6. Objetivos                                                       | 27 |
| 6.1 Objetivo general                                               | 27 |
| 6.2 Objetivos específicos                                          | 27 |
| 7. Metodología                                                     | 28 |

|        |                                                               |    |
|--------|---------------------------------------------------------------|----|
| 7.1    | Diseño experimental                                           | 28 |
| 7.2    | Recolección y selección de los ingredientes principales       | 30 |
| 7.3    | Obtención de la sopa crema de betabel                         | 31 |
| 7.4    | Tratamiento por termosonicación                               | 32 |
| 7.5    | Diseño experimental de los ensayos de superficie de respuesta | 32 |
| 7.6    | Pasteurización de la sopa crema de betabel                    | 34 |
| 7.7    | Propiedades fisicoquímicas                                    | 34 |
| 7.7.1  | pH                                                            | 34 |
| 7.7.2  | Sólidos solubles totales (SST)                                | 35 |
| 7.7.3  | Acidez titulable                                              | 35 |
| 7.7.4  | Estabilidad física                                            | 35 |
| 7.7.5  | Viscosidad                                                    | 36 |
| 7.7.6  | Color                                                         | 36 |
| 7.8    | Liofilización de la muestra                                   | 36 |
| 7.9    | Propiedades funcionales                                       | 37 |
| 7.9.1  | Capacidad de retención de agua                                | 37 |
| 7.9.2  | Capacidad de retención de lípidos                             | 37 |
| 7.9.3  | Capacidad de retención de glucosa                             | 38 |
| 7.9.4  | Capacidad de hinchamiento                                     | 39 |
| 7.9.5  | Capacidad emulsificante                                       | 39 |
| 7.10   | Extracción de compuestos antioxidantes                        | 40 |
| 7.11   | Determinación de compuestos antioxidantes                     | 40 |
| 7.11.1 | Betalaínas                                                    | 40 |
| 7.11.2 | Contenido fenólico total                                      | 41 |
| 7.12   | Capacidad antioxidante                                        | 42 |
| 7.12.1 | ABTS                                                          | 42 |
| 7.12.2 | DPPH                                                          | 42 |
| 7.12.3 | FRAP                                                          | 42 |
| 7.13   | Bioaccesibilidad <i>in vitro</i> de antioxidantes             | 43 |
| 7.14   | Análisis estadístico                                          | 44 |
| 8.     | Resultados y discusión                                        | 44 |
| 8.1    | Propiedades fisicoquímicas                                    | 44 |
| 8.1.1  | Color                                                         | 45 |

|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 8.1.2 Viscosidad y propiedades funcionales de sopa crema de betabel                    | 50 |
| 8.2 Compuestos antioxidantes                                                           | 54 |
| 8.2.1 Betalaínas                                                                       | 54 |
| 8.2.2 Contenido fenólico total                                                         | 54 |
| 8.3 Capacidad antioxidante                                                             | 56 |
| 8.4 Optimización de la sopa crema de betabel termosonicada                             | 58 |
| 8.5 Reproducibilidad del estudio                                                       | 61 |
| 8.6 Comparación de sopa crema de betabel optimizada con una sopa crema<br>pasteurizada | 62 |
| 8.7 Propiedades fisicoquímicas                                                         | 62 |
| 8.7.1 pH                                                                               | 62 |
| 8.7.2 Color                                                                            | 63 |
| 8.7.3 Estabilidad física                                                               | 64 |
| 8.8 Viscosidad y propiedades funcionales                                               | 65 |
| 8.8.1 Viscosidad                                                                       | 65 |
| 8.8.2 Capacidad de retención de agua e hinchamiento                                    | 66 |
| 8.8.3 Capacidad de retención de lípidos                                                | 69 |
| 8.8.4 Capacidad de retención de glucosa                                                | 70 |
| 8.9 Bioaccesibilidad <i>in vitro</i> de compuestos bioactivos y capacidad antioxidante | 72 |
| 8.9.1 Betalaínas                                                                       | 72 |
| 8.9.2 Contenido fenólico total                                                         | 74 |
| 8.9.3 Capacidad antioxidante por ABTS, DPPH y FRAP                                     | 76 |
| 9. Conclusiones                                                                        | 81 |
| 10. Recomendaciones                                                                    | 82 |
| 11. Referencias bibliográficas                                                         | 83 |



## Índice de figuras

|                                                                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Estructura del betabel                                                                                            | 16 |
| Figura 2. Diagrama de las etapas metodológicas de sopa crema de betabel en la primera fase                                  | 29 |
| Figura 3. Diagrama de las etapas metodológicas para la comparativa de tratamientos de sopa crema de betabel en segunda fase | 30 |
| Figura 4. Escala de color CIE Lab, hue y croma y muestra de sopa crema de betabe                                            | 47 |
| Figura 5. Efecto de la termosonicación sobre color de sopa crema de betabel                                                 | 49 |
| Figura 6. Efecto de la termosonicación sobre viscosidad y propiedades funcionales de la sopa crema de betabel               | 53 |
| Figura 7. Efecto del termosonicación sobre betaninas, betaxantinas y contenido fenólico total                               | 56 |
| Figura 8. Efecto de termosonicación sobre la capacidad antioxidante de sopa crema de betabel                                | 58 |
| Figura 9. Traslape de figuras de contorno                                                                                   | 60 |
| Figura 10. pH de sopas cremas                                                                                               | 62 |
| Figura 11. Estabilidad física de sopa crema de betabel                                                                      | 65 |
| Figura 12. Viscosidad de sopas cremas                                                                                       | 66 |
| Figura 13. Capacidad de retención de agua y capacidad de hinchamiento de sopas cremas de betabel                            | 68 |
| Figura 14. Capacidad de retención de lípidos de sopas cremas de betabel                                                     | 70 |
| Figura 15. Capacidad de retención de glucosa de sopas cremas de betabel                                                     | 71 |
| Figura 16. Contenido de betaninas y betaxantinas en muestra original y fracción bioaccesible de sopas cremas de betabel     | 73 |
| Figura 17. Contenido fenólico total en muestra original y fracción bioaccesible de sopas cremas                             | 75 |
| Figura 18. Capacidad antioxidante por ABTS, DPPH y FRAP en sopas crema                                                      | 78 |

## Índice de tablas

|                                                                                                                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1. Composición nutrimental del betabel ( <i>Beta vulgaris</i> L.)                                                                                                                      | 15 |
| Tabla 2. Diseño experimental                                                                                                                                                                 | 33 |
| Tabla 3. Efecto de termosonicación sobre pH, sólidos solubles totales, acidez titulable y estabilidad física en sopa crema de betabel                                                        | 45 |
| Tabla 4. Efecto del tratamiento por termosonicación sobre los parámetros de color en sopa crema de betabel                                                                                   | 46 |
| Tabla 5. Coeficiente de regresión y ANOVA de los parámetros del modelo cuadrático de predicción de superficie de respuesta de las variables color                                            | 48 |
| Tabla 6. Efecto del tratamiento de termosonicación sobre la viscosidad y propiedades funcionales de sopa crema de betabel                                                                    | 51 |
| Tabla 7. Coeficiente y ANOVA de los parámetros del modelo cuadrático de predicción de superficie de respuesta de viscosidad y propiedades funcionales de sopa crema de betabel termosonicada | 52 |
| Tabla 8. Efecto de tratamiento por termosonicación sobre los compuestos antioxidantes de sopa crema de betabel                                                                               | 55 |
| Tabla 9. Coeficiente de regresión y ANOVA de los parámetros del modelo cuadrático de predicción de superficie de respuesta de las variables de betalainas y contenido fenólico total         | 55 |
| Tabla 10. Efecto del tratamiento de termosonicación sobre la capacidad antioxidante de sopa crema de betabel                                                                                 | 57 |
| Tabla 11. Coeficiente de regresión y ANOVA de los parámetros del modelo cuadrático de predicción de superficie de respuesta de variables de capacidad antioxidante                           | 58 |
| Tabla 12. Reproducibilidad del modelo de superficie de respuesta                                                                                                                             | 61 |
| Tabla 13. Coordenadas de color de sopas cremas de betabel                                                                                                                                    | 64 |

## Abreviaturas

a\*: coordenadas rojo/verde

ABTS: 2,2-azinobis (ácido 3-etilbenzotiazolina-6-ácido-sulfónico)

ANOVA: análisis de varianza

b\*: coordenadas amarillo/azul

bs: base seca

C\*: Croma, pureza o saturación

CE: capacidad emulsificante

CH: capacidad de hinchamiento

CRA: capacidad de retención de agua

CRG: capacidad de retención de glucosa

CRL: capacidad de retención de lípidos

DPPH: 1,1-difenil-2-picrilhidrazilo

DNS: ácido 3,5 dinitrosalicílico

Fe-TPTZ: hierro-2,4,6-tripiridyl-1,3,5-triazina

FRAP: Ferric Reducing Antioxidant Power

h°: Hue, tonalidad

HCl: ácido clorhídrico

HCO: carbohidratos

L\*: luminosidad de color

NaHCO<sub>3</sub>: bicarbonato de sodio

NaOH: hidróxido de sodio

pH: potencial de hidrógeno

SPSS: Statistical Package for Social Sciences

SST: sólidos solubles totales

## Unidades de medida

°Brix: grados Brix

°C: grados centígrados

cP: Centipoise

EAG: equivalentes de ácido gálico

ET: equivalentes de Trolox

g: gramos

g/g: gramo por gramo

GHz: gigahertz

kHz: kilohertz

µg: microgramo

µL: microlitro

µmol: micromoles

µmol/L: micromol por litro

M: molar o molaridad

mg: miligramo

mg EB: equivalentes de betalaínas

mg/g: miligramo por gramo

min: minutos

mL: mililitro

mol/cm: moles por centímetro

N: Normalidad

nm: nanómetros

%: porcentaje

rpm: revoluciones por minuto

v/v: volumen por volumen

## 1. Resumen

El Betabel (*Beta vulgaris* L.) es una raíz vegetal a la que se le atribuyen compuestos bioactivos como las betalaínas y los fenoles relacionados con el tratamiento y prevención de algunas enfermedades no transmisibles. Este es consumido mayormente en ensaladas y jugos, sin embargo se puede utilizar en otras preparaciones para aumentar su consumo como en sopa crema. En el procesamiento para su preparación se aplican temperaturas altas que provocan cambios en color, olor y textura, así como sus propiedades nutricionales. Por ello, se busca la utilización de tecnologías emergentes como el termoultrasonido, el cual evita mínimas alteraciones en las propiedades fisicoquímicas y propicia la liberación de compuestos bioactivos. El objetivo del presente trabajo fue comparar el proceso de termosonicación y pasteurización de una sopa crema a base de betabel evaluando las propiedades fisicoquímicas, funcionales y antioxidantes para obtener un producto con mayores beneficios. La sopa crema fue adicionada con polvo de oca como espesante, se usaron amplitudes de 72–93% y tiempo de 9–16 minutos. La condición óptima del proceso fue de 83% de amplitud con tiempo de 12.50 minutos, y las variables que se ajustaron al modelo matemático fueron pH (6.71), viscosidad (334 cP), estabilidad física (63.77%),  $a^*$  (25.32)  $C^*$  (25.09), capacidad de retención de agua (0.79 g/g) y capacidad de retención de glucosa (16.75 mg/g). La sopa crema optimizada en comparación con el control y pasteurizado, arrojó valores más altos en pH (6.72), viscosidad (180 cP) y  $a^*$  (23.31). Se obtuvo mayor contenido fenólico total, betaninas y betaxantinas (122.27 mg EAG/100 g bs, 65.65 mg EB/100 g bs y 40.53 mg EI/100 g bs, respectivamente). En bioaccesibilidad in vitro, los resultados fueron mayores en la sopa termosonicada respecto a contenido fenólico total, betaninas y betaxantinas (807.96 mg EAG/100 g bs, 220.36 mg EB/100 g bs y 172.02 mg EI/100 g bs, respectivamente). Finalmente, la sopa crema de betabel termosonicada obtuvo en su mayoría, mejores resultados que la pasteurización, aumentando contenido de compuestos bioactivos, por lo que podría ser una alternativa para su aplicación.

**Palabras clave:** betabel, *Beta vulgaris* L., termosonicación, superficie de respuesta, antioxidantes.

## 2. Abstract

Beetroot (*Beta vulgaris* L.) is a root vegetable that is attributed with bioactive compounds such as betalains and phenols related to the treatment and prevention of some non-communicable diseases. It is mostly consumed in salads and juices, however it can be used in other preparations to increase its consumption such as in cream soup. In the processing for its preparation, high temperatures are applied that can cause changes in color, smell and texture, as well as in its nutritional properties, therefore, the use of emerging technologies such as thermosonication is sought, which avoids minimal alterations in the physicochemical properties and favors the release of bioactive compounds. The objective of this work was to compare the thermosonication and pasteurization process of a cream soup based on beet, evaluating the physicochemical, functional and antioxidant properties to obtain a product with greater benefits. Goose powder was added to the cream soup as a thickener, amplitudes of 72-93% and time of 9-16 minutes were used. The optimum process condition was 83% amplitude with a time of 12.50 minutes, and the variables that were adjusted to the mathematical model were pH (6.71), viscosity (334 cP), fistic stability (63.77%),  $a^*$  (25.32)  $C^*$  (25.09), water holding capacity (0.79 g/g) and glucose holding capacity (16.75 mg/g). The optimized cream soup compared to the control and pasteurized ones, showed higher values in pH (6.72), viscosity (180 cP) and  $a^*$  (23.31). The content of total phenolics, betanins and betaxanthins were higher (122.27 mg EAG/100 g bs, 65.65 mg EB/100 g bs and 40.53 mg EI/100 g bs, respectively). Regarding *in vitro* bioaccessibility, the results were superior in the thermosonicated soup regarding the content of total phenols, betanins and betaxanthins (807.96 mg EAG/100 g bs, 220.36 mg EB/100 g bs and 172.02 mg EI/100 g bs, respectively). Finally, the thermosonicated beetroot cream soup mostly obtained better results than pasteurization, increasing its content of bioactive compounds, so it could be an alternative for its application.

**Keywords:** beet, *Beta vulgaris* L., thermosonication, response surface, antioxidant.

### **3. Marco teórico**

#### **3.1 Betabel**

El betabel (*Beta vulgaris* L.), también conocida como remolacha, betarraga, betarata, Betereva y remolacha roja (Bach et al., 2014). Es miembro de la familia Chenopodiaceae de raíz diversa con textura rígida, que cuenta con una larga tradición de uso en la cocina nórdica (Europa del Este), ya que tiene un sabor terroso debido a los compuestos presentes en ella llamados "pirazina" y "geosmina", por lo que ayuda a neutralizar algunas preparaciones (Bach et al., 2014; Kaur et al., 2022). Además, es ampliamente utilizada como colorante alimentario natural, obteniendo su color distintivo debido a los pigmentos llamados betalainas, las cuales son solubles en agua (Bach et al., 2014; Punia et al., 2022). También contienen una cantidad apreciable dentro de su composición antioxidantes y es abundante en nutrientes; por ello su diversidad fitoquímica la convierte en fuente potencial de compuestos, a partir de los cuales se pueden obtener alimentos funcionales (Hernández, 2021).

#### **3.2 Producción a nivel mundial y nacional**

El betabel se ha cultivado durante más de un siglo para aumentar el rendimiento y ahora representa casi el 30% del mundo, y más del 50% de la producción de azúcar de EE. UU (Zicari, 2019). Además, el tiempo de cosecha de este tubérculo de 75 a 90 días en verano y de 100 a 120 días en invierno, en donde el contenido de azúcar de esta raíz depende de la disponibilidad de nitrógeno, que se aplica en las primeras etapas de crecimiento (Chhikara et al., 2018).

En México se siembra una superficie de 1,048 hectáreas, repartidas en 15 estados, donde Puebla produce un aproximado anual de 10,000 toneladas, de las cuales en el periodo otoño-invierno se produce más betabel, y también en el Estado de México, Jalisco, Sonora, Baja California y Guanajuato (SADER, 2020). Jalisco (con más de 3 mil toneladas) y Baja California (con más de dos mil toneladas) son líderes en producción de betabel (SAGARPA, 2020). Su consumo aproximado en México es de 0.51 kg por persona al año, en comparación con

otras verduras como la calabaza, que tiene un consumo de 1.6 kg por habitante al año (SIAP, 2021; SADER, 2022).

El betabel es una de las raíces vegetales más importantes, ya que es rica en carbohidratos, micronutrientes y diversos componentes funcionales (Chhikara et al., 2018). En la tabla 1 se muestra la composición nutrimental del betabel, cuenta con un bajo contenido de grasas pero es elevada en carbohidratos, fibra soluble y proteínas; así como ácido fólico y antioxidantes. Al contar con un alto contenido en fibra, se vuelve un alimento ideal en el aporte de ésta, sin embargo, se encuentra mayormente en la cáscara (Ceclu y Nistor, 2020). Además, en las raíces del betabel se encuentran vitaminas como la C, A, B1 y B2, así como minerales (magnesio, potasio, fósforo y hierro) (Malien-Aubert et al., 2000). No obstante, la composición química y nutrimental del betabel dependerá de la variedad y de la parte morfológica referida, ya que está compuesta por las hojas, bulbo, la cáscara, el tallo y la raíz (Figura 1) (Ceclu y Nistor, 2020).

### **3.3 Composición nutricional**

El betabel es una de las raíces vegetales más importantes, ya que es rica en carbohidratos, micronutrientes y diversos componentes funcionales (Chhikara et al., 2018). En la tabla 1 se muestra la composición nutrimental del betabel, cuenta con un bajo contenido de grasas pero es elevada en carbohidratos, fibra soluble y proteínas; así como ácido fólico y antioxidantes. Al contar con un alto contenido en fibra, se vuelve un alimento ideal en el aporte de ésta, sin embargo, se encuentra mayormente en la cáscara (Ceclu y Nistor, 2020). Además, en las raíces del betabel se encuentran vitaminas como la C, A, B1 y B2, así como minerales (magnesio, potasio, fósforo y hierro) (Malien-Aubert et al., 2000). No obstante, la composición química y nutrimental del betabel dependerá de la variedad y de la parte morfológica referida, ya que está compuesta por las hojas, bulbo, la cáscara, el tallo y la raíz (Figura 1) (Ceclu y Nistor, 2020).



Tabla 1. Composición nutrimental del betabel (*Beta vulgaris* L)

| Por cada 100 g      |         |
|---------------------|---------|
| Calorías            | 45 kcal |
| Carbohidratos (HCO) | 9,6 g   |
| Lípidos totales     | 1 g     |
| Proteína            | 0.7 g   |
| Fibra total         | 87,4 g  |
| Ceniza              | 0.55 g  |
| Vitamina A          | 20 UI   |
| Vitamina B          | 0,4 mg  |
| Vitamina B2         | 0,05 mg |
| Vitamina C          | 4.9 mg  |
| Calcio              | 27 mg   |
| Fosforo             | 43 mg   |
| Magnesio            | 23 mg   |
| Hierro              | 0.80 mg |
| Potasio             | 235 mg  |
| Sodio               | 78 mg   |

(Babarykin et al., 2019; Malien-Aubert et al., 2000)

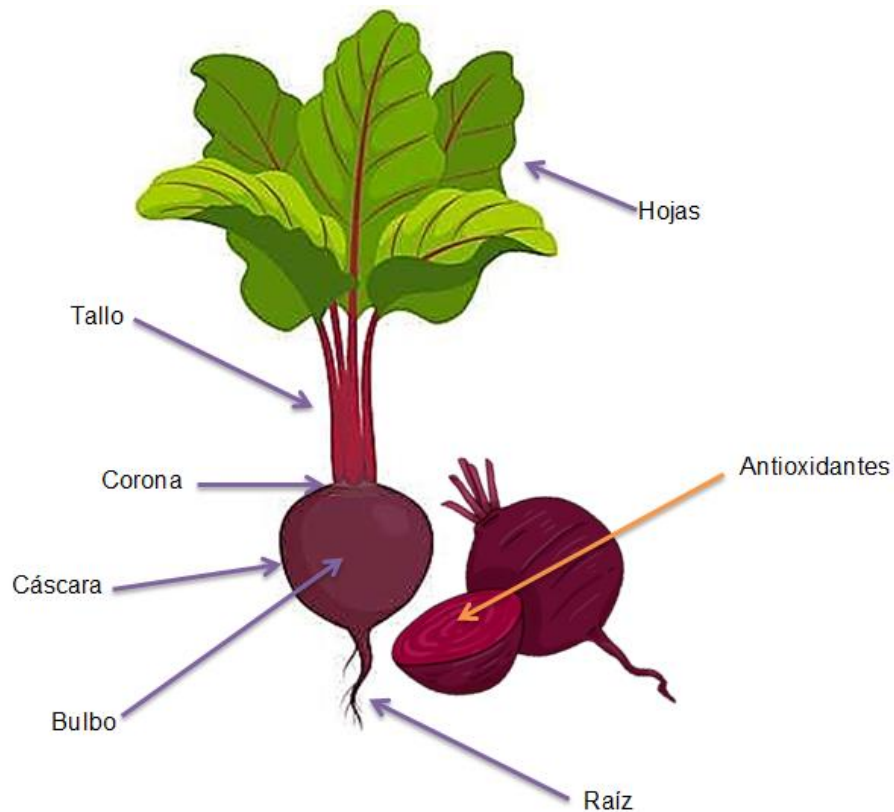


Figura 1. Estructura del betabel (Elaboración propia)

### 3.3.1 Betalaínas

Las betalaínas son compuestos nitrogenados y solubles en agua. Su nombre proviene del nombre latino de la remolacha (*Beta vulgaris*), ya que fue la primera planta a partir de la cual se identificaron (Kaushik, 2022). Hasta ahora se conocen alrededor de 70 betalainas, poseen una estructura base de diazoheptametina y su resonancia estructural da como resultado su color (Chhikara et al., 2018). Por lo que se pueden distinguir dos grupos, las betacianinas (betanina, isobetanina, protetanina y neobetanina) que proporcionan un color violeta-rojizo y las betaxantinas (vulgaxantina, miraxantina, portulaxantina e indicaxantina) responsables del color amarillo (Kaushik, 2022). En el betabel, las betalaínas están presentes principalmente en las vacuolas celulares y corresponden del 75 al 95% de estos compuestos (Badui, 2013). Existen en mayor concentración en la cubierta de este tubérculo y disminuyen progresivamente hacia el interior (pulpa y corona), lo que da como resultado una mejor utilización del betabel en su presentación completa, sin embargo el compuesto de betalaínas más abundante

en el betabel es la betanina (Chhikara et al., 2019; Kaushik, 2022). El almacenamiento se encuentra en la raíz, donde puede alcanzar concentraciones de 0.5 g/kg (Strack et al., 2003).

### **3.3.2 Compuestos fenólicos**

Los fenoles son una gran familia de fitoquímicos con poder bioactivo de alimentos, especias, plantas y nutraceuticos (Tresserra-Rimbau et al., 2018; Ververidis et al., 2007). Se caracterizan por la presencia de uno o más anillos aromáticos que llevan restos hidroxilo y su estructura varía desde moléculas simples como ácidos fenólicos, hasta moléculas polimerizadas, como los taninos condensados (Tresserra-Rimbau et al., 2018).

Los compuestos fenólicos presentes en el betabel provienen principalmente de la cáscara y estos se relacionan con la actividad antioxidante, ya que disminuyen eficazmente especies reactivas de oxígeno y mantienen la homeostasis del estado redox celular (Valko et al., 2007; Tresserra-Rimbau et al., 2018).

### **3.3.3 Flavonoides**

Los flavonoides son subproductos del metabolismo y su acumulación comienza directamente debajo de la piel de las frutas, vegetales y progresa al interior del fruto (Takács-Hájos & Vargas-Rubóczki, 2022). En el betabel, las principales clases de flavonoides son la betagarina, betavulgarina, ciclofilina A y dihidroisorhamnetinas (Maraie et al., 2014).

Los flavonoides son susceptibles a experimentar transformaciones en presencia de oxígeno y ácido ascórbico; de igual manera pueden degradarse por vía enzimática, lo cual afecta a los productos que contienen estos pigmentos (Pisoschi & Negulescu, 2011; Enaru et al., 2021). Sin embargo, constituyen un grupo heterogéneo de moléculas capaces de capturar radicales libres, que producen especies menos dañinas reduciendo el nivel de estrés oxidativo (Varshney et al., 2019).

### **3.3.4 Carotenoides**

Los carotenoides son un grupo de fitoquímicos responsables del color amarillo y naranja de numerosas frutas y hortalizas, por lo general se encuentran en los cromoplastos de los tejidos vegetales (Kaushik, 2022; Coultate, 2007). Tanto las hojas como el tubérculo (1.9 mg/100 g) contienen  $\beta$ -caroteno (Rebecca et al., 2014). Por lo que el consumo de betabel tiene un efecto antioxidante y desarrolla un papel importante en el sistema inmune de los seres humanos (Kaushik, 2022).

### **3.3.5 Fibra dietética**

De acuerdo al Codex Alimentarius (2009), la fibra dietética consiste en polímeros de carbohidratos, que no son hidrolizados por enzimas endógenas en el intestino delgado de los seres humanos. También se puede definir como el grupo de polímeros y oligómeros de carbohidratos, que promueven la digestión en el intestino delgado y pasan al intestino grueso, en donde son parcial o completamente fermentados por la microbiota intestinal (Fuller et al., 2016).

Existe una clasificación para las fibras, catalogadas como fibra soluble e insoluble. La fibra soluble tiene mejor capacidad de hidratación, la cual conduce a la formación de viscosidad, fermentación y producción de ácidos grasos de cadena corta que estimulan la producción de ciertas hormonas. Por otro lado, la fibra insoluble se relaciona con el incremento del volumen fecal y reducción del tiempo de tránsito intestinal (Eswaran, Muir & Chey, 2013; Vilcanqui-Pérez & Vílchez-Perales, 2017).

## **3.4 Compuestos bioactivos del betabel y su importancia en la salud**

La importancia de los compuestos bioactivos en el betabel, radica en el conocimiento de su estabilidad para su aplicación en diversos productos alimentarios, así como la influencia de su procesamiento y almacenamiento (Takács-Hájos & Vargas-Rubóczki, 2022). Además, estos representan un alto beneficio para la salud ya que se encuentran en un amplio contenido de compuestos, como los antioxidantes (betalainas, flavonoides, carotenoides) (Chen et al., 2017). La cantidad de éstos es un parámetro importante para evaluar el

potencial biológico de los alimentos y en concentraciones relativamente altas, tienen una potente capacidad antioxidante en el tejido vegetal (Ramírez-Ramos et al., 2015). Así como su contenido de fibra, compuestos importantes en la salud humana (Cui et al., 2019).

Las betalaínas actúan con potencial quimiopreventivo por sus propiedades anticancerígenas, prevención de enfermedades cardiovasculares, así como la presencia de propiedades antimicrobianas (Echevarria, 2017; Chhikara et al., 2019). Los flavonoides son antianémicos, antihipertensivos, antipiréticos, antibacterianos y en líneas celulares de cáncer, reducen ligeramente la respuesta inflamatoria, modulando la respuesta inmune (Chhikara et al., 2018; Sardana et al., 2018). También los carotenoides actúan como antioxidantes, anticancerígenos, inmunopotenciadores y fotoprotectores de estructuras como tejidos epiteliales y oculares (Durán-Cabral et al., 2017; Chhikara et al., 2019). Así mismo, los nitratos presentes en el betabel tienen la capacidad de bajar la presión arterial y proteger la modulación de la función mitocondrial, reducir el colesterol LDL oxidado y normalizar la presión arterial (Chhikara et al., 2018). Por otro lado, el consumo adecuado de fibra, tanto soluble como insoluble, mantiene un mejor control glucémico, mejora la función intestinal, reduce el colesterol (colesterol total y colesterol LDL), favorece el control de peso y aumenta la absorción de minerales (Villanueva-Flores, 2019; Jones, 2013; Grabitske & Slavin, 2009).

### **3.5 Formas de consumo y utilización a nivel industrial**

El betabel (*Beta vulgaris* L.) se consume tradicionalmente crudo, horneado o en escabeche, pero recientemente ha surgido un mayor interés de su utilización dentro de la cocina. En consecuencia, se ha elevado la demanda de productos y materias primas para diferentes preparaciones culinarias (Bach et al., 2014).

El betabel se ha usado como colorante en la fabricación de bebidas al 5, 10, 15 y 20% (Sharma, Mazumdar & Keshav, 2020). También alimentos como pastas con una proporción de 10, 20, 30 y 40%, salsas (0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 y 3%), postres con porcentajes de 5, 10, 15 y 20%, mermeladas (50, 55 y 60%), yogurt (4, 6 y 8%), sopas crema (25, 50 y 75%) y jugos (70%) (Chhikara et al., 2018; Perumpuli et al.,

2018; Soğuksulu & Külçü, 2023; Angkasa et al., 2021; Holovko et al., 2023; Damunupola, Weerathilake & Sumanasekara, 2014).

### **3.5.1 Jugo de betabel**

Durante el siglo III, el betabel se usaba como alimento y bebidas a pesar de que se habían cultivado durante miles de años con fines medicinales. El jugo de este tubérculo se utiliza para colorear una variedad de alimentos como productos lácteos, yogures, alimentos procesados, queso y dulces (Chhikara et al., 2018). Los colorantes naturales son solubles en agua, lo que facilita su incorporación a diversos alimentos y con estos se genera más atracción y efectos potenciales para la salud debido a los antioxidantes (Sharma, Mazumdar & Keshav, 2020).

### **3.5.2 Sopas instantáneas**

La sopa instantánea es un tipo de alimento procesado que contiene cantidades relativamente altas de almidón (Islam et al., 2018). También puede ser elaborada a partir de una mezcla de ingredientes como vegetales, carne deshidratada, especias, harina, pasta, leche, huevo y otros elementos (Carvalho et al., 2020). Es un alimento popular en la actualidad moderna, debido a su mínimo tiempo de preparación y vida útil, relativamente larga (Upadhyay et al., 2017). Se han identificado distintos países de donde provienen las sopas listas para consumir y el que tiene mayor participación es México con 69.4%, luego se encuentra Estados Unidos con un 27.8%, esto debido a la oferta y demanda de estos productos (Aguilar-Quintana, Velarde-Mendivil & Camarena-Gómez, 2021). Actualmente, América Latina a nivel mundial, tiene el quinto lugar en ventas de sopas instantáneas (López-Torres & López-Alcaraz, 2022).

Las sopas pueden ser sólidas, líquidas o en polvo y algunas contienen una mezcla de condimentos para agregarles sabor una vez preparadas, mientras que otras, cuentan con una combinación de diferentes alimentos como pollo, tomate, vegetales, cebolla, arroz o también pueden ser cremas de champiñones, elote, tomate o queso, cada una es similar entre sí, sin embargo cuentan con diferentes ingredientes y presentaciones (Aguilar-Quintana, Velarde-Mendivil & Camarena-

Gómez, 2021). Hasta el momento no existen sopas instantáneas a base de betabel, por lo que sería importante considerarlo.

### **3.5.3 Sopa crema**

La sopa es un sistema alimentario que data de tiempos remotos y su origen radica en la necesidad de ablandar los alimentos con agua hirviendo (Furlotti, Jaure & Agnesio, 2024). Mientras que la crema o crema ácida es un tipo de producto lácteo fermentado con bacterias ácido lácticas y proviene de la grasa de la leche (Wang et al., 2023).

Las sopas y cremas de verduras han ganado popularidad entre los consumidores debido a la gran variedad de materias primas que se pueden utilizar en su formulación (Fernández-López et al., 2020). Hay sopas simples o claras, las cuales se conforman de un fondo claro, con acompañamiento de verduras o carne y pueden ser las sopas caldosas o sopas vegetales. Las sopas ligadas son opacas y están ligadas a un espesante como el roux (mezcla de harina o fécula de maíz con mantequilla o margarina) o el agregado de uno (Furlotti, Jaure & Agnesio, 2024). Sin embargo en el 2022, se reportó que algunas de las sopas cremas presentes en el mercado, contenían porcentajes más bajos en el ingrediente principal, a lo expuesto en su etiqueta nutricional y su vez, se encontró un elevado contenido en almidones y sodio, ya que estas deben conservarse y tener consistencias cremosas (Profeco, 2022). Por otra parte, en la industria alimentaria, no existen sopas cremas de betabel hasta el momento, por lo que es relevante considerarlo. También es importante mencionar que las sopas cremas se nombran de acuerdo al ingrediente principal y existen diferentes formas de conservación dentro del mercado, como el enlatado y la pasteurización (Furlotti, Jaure & Agnesio, 2024; Fernández-López et al., 2020).

### **3.6 Pasteurización**

La pasteurización es un tratamiento de calor moderado que elimina las bacterias patógenas que pudieran estar presentes en alimentos y bebidas, como la leche, jugo, alimentos enlatados y otros (Charley, 2012). Sin embargo, algunos

microorganismos no patógenos permanecen en la leche como las bacterias ácido lácticas y las termoresistentes (bacterias psicrótroficas) (Charley, 2012; Vásquez et al., 2019). Por esta razón, la leche se enfría inmediatamente después de la pasteurización (10 °C o menos) para evitar el rápido crecimiento y multiplicación de las bacterias que permanecen (Charley, 2012). El proceso de pasteurización se aplica en diferentes productos como jugos, lácteos y sopas cremas. Para efectuar la pasteurización por ejemplo en la leche, puede calentarse hasta 62 °C y mantenerse a esta temperatura por 30 minutos (pasteurización lenta), o bien calentarse entre 72 y 85 °C y conservarse así por 15 segundos (pasteurización rápida); aunque una desventaja de la pasteurización es que puede ocurrir un pequeño grado de pérdidas de vitaminas y antioxidante (Charley, 2012; Fernández-López et al., 2020). Para evitar esos cambios o pérdidas por la pasteurización, existen alternativas de conservación como la aplicación de tecnologías como el ultrasonido.

### **3.7 Ultrasonido**

La búsqueda de nuevas técnicas para su uso dentro de la industria alimentaria ha dado como consecuencia tecnologías emergentes. El ultrasonido es una de ellas por su amplia gama de utilidad con grandes ventajas, como lo es en el procesamiento de frutas, jugos y productos lácteos (Firouz et al., 2019). La base de muchas aplicaciones del ultrasonido es debido a la cavitación, la cual se refiere a la formación, crecimiento y colapso de microburbujas dentro de una solución y como resultado el colapso de burbujas causadas por el campo de ultrasonido aplicado (Firouz et al., 2019; Izadifar, Babyn & Chapman, 2019). El ultrasonido se basa en la baja y alta intensidad, las cuales operan en el rango de 20 kHz y 1 GHz; se propaga a través de medios sólidos, líquidos y gaseosos, en donde se pueden extraer diversos compuestos orgánicos debido al aumento de tasas de transferencia de masa y la ruptura de pared celular durante la cavitación (Madalão et al., 2021). Así, como alta y baja frecuencia de las ondas generadas, de tal manera que promuevan mejores tiempos y transferencia de energía a los alimentos (Téllez-Morales, Hernández-Santo & Rodríguez-Miranda, 2020). La aplicación de ultrasonido a baja frecuencia genera fuertes fuerzas físicas,



mientras que una mayor frecuencia provoca alto rendimiento de radicales por cavitación acústica (Kentish & Ashokkumar, 2010). El procesamiento de alimentos realizado mediante ultrasonido de alta intensidad se utiliza para generar cambios permanentes en el medio tratado y ha sido prometedor, ya que este favorece la inactivación de microorganismos y enzimas en alimentos y bebidas, donde se permite brindar estabilidad (Robles-Ozuna & Ochoa-Martínez, 2012; Kobus et al., 2023). Por el contrario, las aplicaciones de ultrasonido de baja intensidad, por lo general obtienen información acerca del medio de propagación sin producir modificaciones en su estado (Robles-Ozuna & Ochoa-Martínez, 2012). Para un mayor efecto, el ultrasonido puede combinarse con presión (manosonicación) o con calor (termosonicación) (Sánchez-Moreno et al., 2018).

### **3.8 Termoultrasonido**

La termosonicación o proceso de termoultrasonido es una alternativa de tratamiento térmico que combina el poder del ultrasonido con temperaturas controladas, que utiliza tiempos de retención cortos, permitiendo la conservación de los compuestos en los alimentos y sus características sensoriales, ya que se tiene un daño mínimo (Abdulstar et al., 2023; Xu et al., 2023; Ibrahim, 2020). Cuando se aplica calor y ondas ultrasónicas con temperaturas mayores a 50 °C se le llama termoultrasonido (Costa et al., 2013). Sin embargo, la temperatura aumenta de acuerdo al tratamiento aplicado y por esto se requiere un control de esta (Knorr et al., 2004). Durante el procesamiento, las ondas se propagan a través del alimento, generando alteraciones en la presión que resultan en la creación de burbujas, estas colapsan y provocan zonas de alta temperatura y presión que se conoce como cavitación, lo cual puede descomponer los materiales en partículas más pequeñas y aumentar las reacciones químicas, favoreciendo el tiempo de procesamiento (Aadil et al., 2020; Ye et al., 2019; Ashokkumar, 2011). También, los impactos mecánicos interfieren en las membranas celulares propiciando la liberación de diversos compuestos presentes en los alimentos como los antioxidantes y al descomponer los materiales en partículas más pequeñas, se puede mejorar la uniformidad de los componentes (Abdulstar et al., 2023). Asimismo, el termoultrasonido es una técnica respetuosa

con el medio ambiente, debido a la reducción de utilización de productos químicos y disolventes agresivos.

Se ha comprobado que esta técnica tiene varios beneficios en la industria alimentaria, ya que proporciona mayor vida útil a los productos, una mejor retención de nutrientes y calidad, que se ha demostrado en jugos, néctares, leche y yogures como el de manzana, tuna guanábana, guayaba, naranja, entre otros (Abdulstar et al., 2023; Abid et al., 2014; Cruz-Cansino et al., 2015; Zafra-Rojas et al., 2023; Tiwari et al., 2009).

#### **4. Problema de investigación**

En México, el betabel (*Beta vulgaris* L.) tiene una gran producción ya que se cosecha durante todo el año. A pesar de esto y comparado con otros vegetales como la calabaza, su consumo *per cápita* a nivel nacional es bajo, debido a sus características sensoriales. Se desaprovechan sus beneficios afectando a los productores y generando desperdicio en las cosechas, debido al bajo interés de la población. El betabel puede ser utilizado como colorante en el procesamiento de productos como jugos, bebidas, mermeladas, yogures y pastelería. Aunque existen compuestos químicos artificiales en diversos productos del mercado, que pudiesen ser sustituidos con este colorante natural. Por lo que se deben generar alternativas que den valor agregado al betabel.

Cuando se habla del procesamiento de sopas, existen pocos estudios sobre el tipo de tratamiento utilizado para mejorar la calidad nutricional del producto. Asimismo, se ha reportado escaso contenido en su ingrediente principal, presenta elevadas concentraciones de almidón y sodio, impactando negativamente en la salud del consumidor. Además, para su conservación se aplican tecnologías convencionales que incluyen temperaturas elevadas, las cuales generan pérdidas de compuestos termolábiles importantes para la salud.

## **5. Justificación**

La generación de un producto procesado como una sopa crema en donde se aproveche todos los beneficios del betabel, puede ser una alternativa para dar un valor agregado a este producto vegetal. Los tratamientos que se llevan a cabo durante el procesamiento de las sopas comerciales ocasionan afectaciones en el producto. Por lo que la alternativa es la utilización de procesos alternos como el ultrasonido. Diferentes estudios en jugos, néctares, quesos, yogures y leches (vegetal y animal) han demostrado resultados positivos en su apariencia física y daños mínimos en las propiedades nutricionales, favoreciendo la liberación de compuestos bioactivos y su bioaccesibilidad. Hasta el momento no existe una sopa crema en la cual, durante el proceso de elaboración se emplea la termosonicación, por lo que esta tecnología emergente incrementa sus características nutricionales y antioxidantes, generando un producto con mejor calidad nutricional.

## 6. Objetivos

### 6.1 Objetivo general

Comparar el proceso de termosonicación y pasteurización en la elaboración de una sopa crema a base de betabel evaluando las propiedades fisicoquímicas, funcionales y antioxidantes para obtener un producto con mayores beneficios.

### 6.2 Objetivos específicos

- Determinar las propiedades fisicoquímicas (pH, acidez titulable, color, viscosidad, sólidos solubles totales y estabilidad física) de una sopa crema termosonicada a base de betabel utilizando el modelo de superficie de respuesta.
- Determinar las propiedades funcionales (capacidad de retención de agua, capacidad de retención de lípidos, capacidad de retención de glucosa y capacidad de hinchamiento) de sopa crema termosonicada de betabel utilizando el modelo de superficie de respuesta.
- Evaluar los compuestos antioxidantes (fenoles y betalaínas) y su capacidad antioxidante (ABTS, DPPH y FRAP) de una sopa crema termosonicada de betabel utilizando el modelo de superficie de respuesta.
- Obtener la condición óptima de proceso de termosonicación sobre las propiedades fisicoquímicas, funcionales y antioxidantes de una sopa crema de betabel.
- Comparar las propiedades fisicoquímicas, funcionales y antioxidantes de una sopa crema de betabel termosonicada y pasteurizada.
- Determinar la bioaccesibilidad *in vitro* de antioxidantes (fenoles y betalainas) y la capacidad antioxidante (ABTS, DPPH y FRAP) de la sopa crema de betabel termosonicada y pasteurizada.

## **7. Metodología**

### **7.1 Diseño experimental**

En la figura 2, se muestra la primera fase, donde se realizaron 13 tratamientos de termosonicación a diferentes condiciones de amplitud y tiempo, los cuales fueron obtenidos por el programa JMP (versión 7.0.2). Las variables de respuesta se analizaron para identificar aquellas que se ajustaron al modelo matemático ( $R^2 \geq 0.90$ ) para obtener la condición óptima por termosonicación y el coeficiente de regresión.

Posteriormente, el programa SigmaPlot (versión 12.0) se utilizó para realizar figuras tridimensionales y visualizar el comportamiento de los resultados del coeficiente de regresión de cada variable de respuesta. También se usó traslape de figuras de contorno para ubicar la condición óptima de proceso. Se realizó la reproducibilidad y se comparó con los valores predichos usando t-student (SPSS versión 15.0).

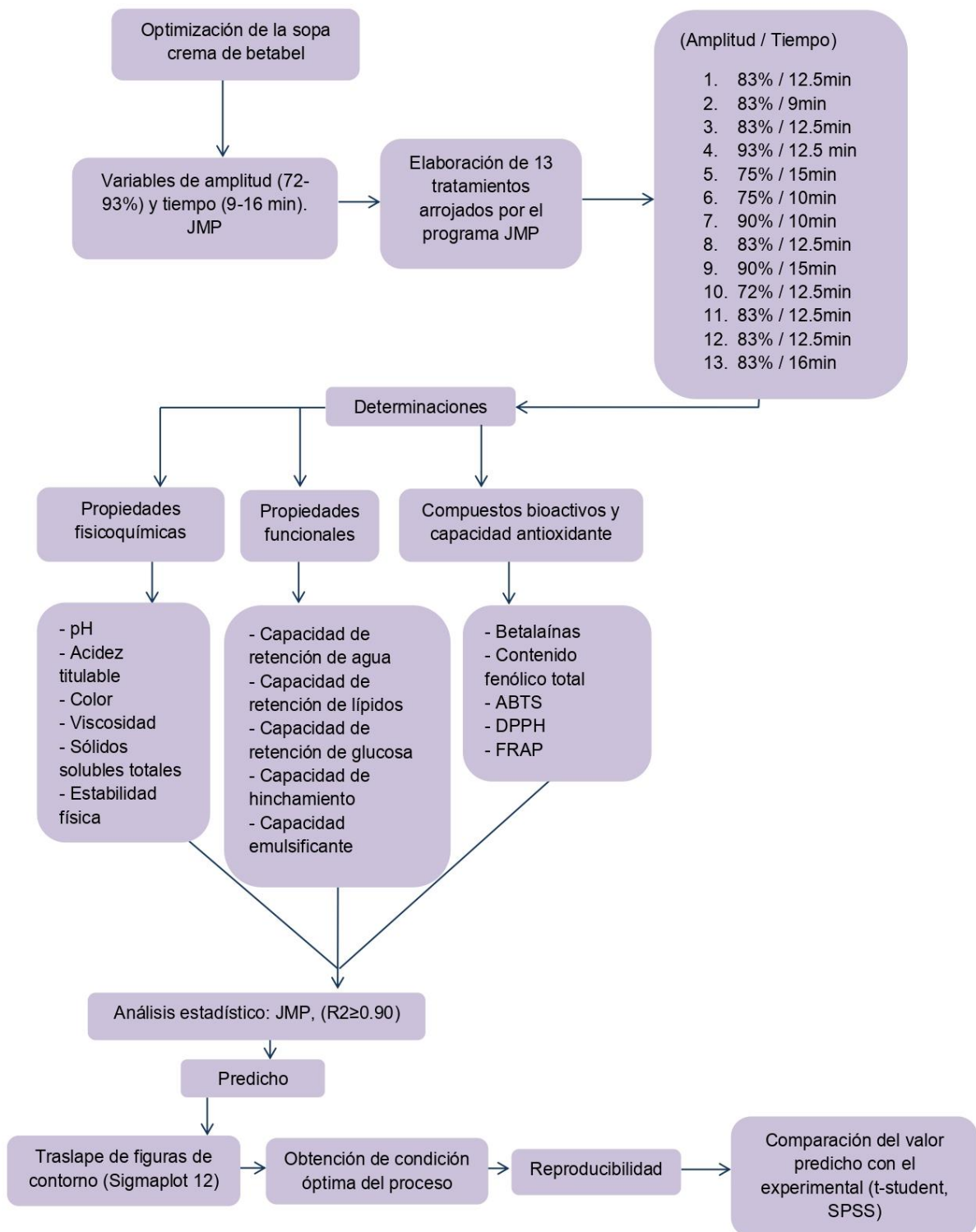


Figura 2. Diagrama metodológico para la optimización de la sopa crema de betabel en la primera fase.

La segunda fase se observa en la Figura 3. La sopa crema de betabel sometida a tratamiento por termosonicación se comparó con una sopa crema pasteurizada y un control (sopa crema casera). Se evaluaron las determinaciones que se ajustaron al modelo matemático ( $R^2 > 0.90$ ), así como algunas otras determinaciones que se consideran importantes en la calidad tecnológica y nutricional en la sopa crema de betabel ( $L^*$ ,  $b^*$ ,  $h^\circ$ , capacidad de retención de lípidos, capacidad de hinchamiento, compuestos fenólicos totales, betaninas, betaxantinas, FRAP y ABTS). Del mismo modo, se realizó el estudio de bioaccesibilidad *in vitro* y los resultados se compararon mediante ANOVA y Duncan, por el programa estadístico SPSS (versión 15.0).

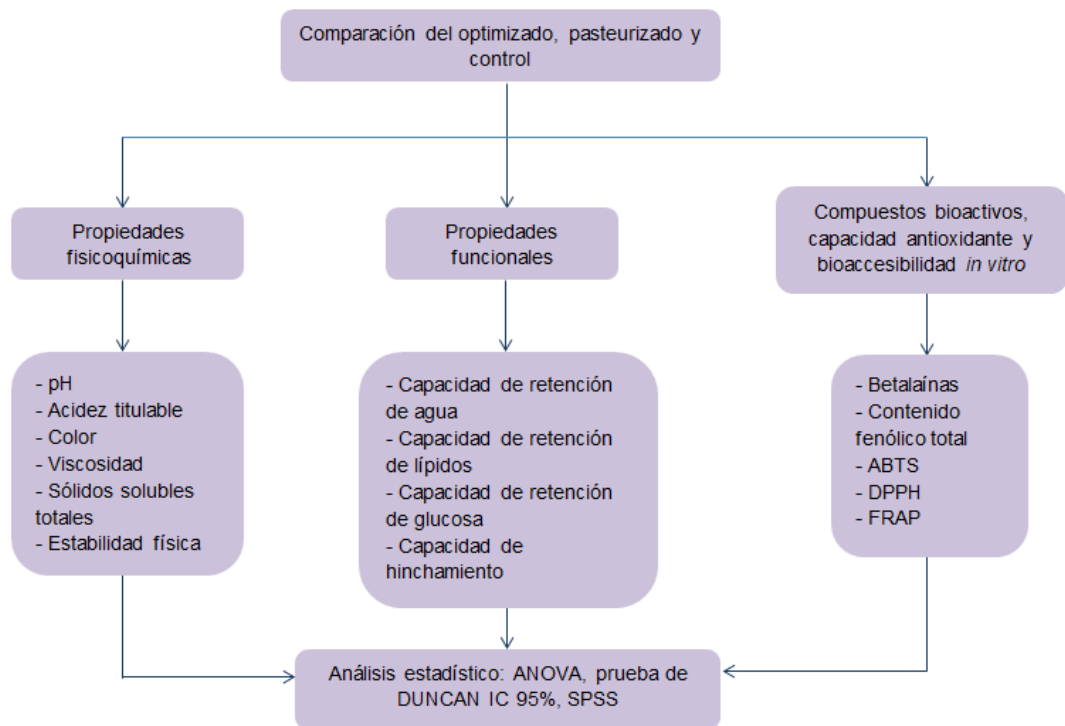


Figura 3. Diagrama de las etapas metodológicas para la comparativa de tratamientos de sopa crema de betabel en segunda fase.

## 7.2 Recolección y selección de los ingredientes principales

El betabel (*Beta vulgaris* L.) se obtuvo de un mercado local de Tulancingo de Bravo, Hidalgo, México. Se seleccionaron aquellos sin daños externos, con un color superficial homogéneo y brillante.



Por otro lado, la leche se adquirió del rancho universitario ubicado en el Instituto de Ciencias Agropecuarias (ICAp) de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo en Tulancingo de Bravo, Hidalgo, México. Ésta fue adquirida de la segunda ordeña de leche bronca fresca y se almacenó en frascos Pyrex a temperatura de 4 °C, los cuales fueron previamente esterilizados en autoclave (Wacs-1080, Wise clave, EUA).

### **7.3 Obtención de la sopa crema de betabel**

Para la obtención de la sopa crema de betabel, se utilizó el polvo de oca para brindar consistencia, laurel, clavo y sal se pesaron en la balanza analítica (ADAM Mod. 1248031) y previamente se esterilizaron en autoclave (Wacs-1080, Wise clave, EUA). Así como los diversos materiales que se ocuparon en el procedimiento. El betabel se sometió a una técnica de lavado descrita por Moreno-Rodas et al. (2021), para su desinfección adecuada.

El procedimiento para la realización de la sopa crema fue estandarizado, partiendo de una receta casera, a la cual se le generaron algunas modificaciones y formulaciones pertinentes en cada ingrediente. En un vaso de precipitado se colocaron 155 mL de agua con 14.7 mg de laurel, 13.5 mg de clavo y 12 g de cebolla, hasta llegar a punto de ebullición por 3 minutos y se retiró del fuego. El betabel (90 g) se sometió a un blanqueado durante 2 minutos. La leche (175 mL) se mantuvo a una temperatura de 8 °C. La sal y pimienta blanca se adicionaron (0.90 g y 1.4 g, respectivamente). Todos los ingredientes se colocaron en una licuadora y se procesó por un periodo de 2 minutos, obteniendo un volumen final de 365 mL. Posteriormente, la mezcla que se obtuvo fue distribuida en tres frascos Pyrex para realizar los tratamientos (sonicado, pasteurizado y control), y se realizó choque térmico a cada uno, de forma inmediata y se mantuvieron en refrigeración a temperatura de 8 °C. Subsecuente a ello, para el tratamiento control, se utilizaron 360 mL de la muestra, la cual se vertió en un vaso de precipitado de 500 mL, se colocó en una parrilla de calentamiento con agitación (Thermo Scientific ELED). Cuando la muestra llegó a 80 °C, se adicionó el polvo de oca, la cual se homogeneizó con ayuda de un agitador magnético. Finalmente, se alcanzó punto de ebullición y se mantuvo durante 3 minutos. Se retiró de la

parrilla para volver a realizar choque térmico y almacenar en refrigeración para pruebas posteriores. Al mismo tiempo los tratamientos se llevaron a cabo, vertiendo la mezcla en la celda de flujo continuo (360 mL), junto con el polvo de oca (3.6 g), que previamente se homogeneizó con una cucharilla estéril en un vaso de precipitado de 25 mL.

#### **7.4 Tratamiento por termosonicación**

El tratamiento de termosonicación se llevó a cabo en un procesador ultrasónico (VCX 1500 HV, Sonics & Materials, Inc. Newtown, EE.UU), con una potencia de 1500 W y tiempos de pulso de 2 segundos encendido y 4 segundos de apagado. Dentro de la celda se emplearon 360 mL de la muestra, con una sonda de 13 mm de diámetro. Esto se aplicó a los 13 tratamientos con los parámetros de amplitud (75 a 90 %) y tiempo (10 a 15 minutos).

En conjunto se utilizó un baño de agua (Cole-Parmer Polystat, EE.UU) estableciendo un control de la temperatura para que la muestra tuviera una temperatura de salida de  $50\text{ °C} \pm 3\text{ °C}$ . Al término del tratamiento de ultrasonido se realizó un vaciado en un Pirex estéril para finalmente llevar a cabo un choque térmico, alcanzado la temperatura de  $8\text{ °C}$  y almacenar a la misma temperatura.

#### **7.5 Diseño experimental de los ensayos de superficie de respuesta**

Se empleó un diseño central compuesto rotatorio, con dos variables independientes (amplitud y tiempo), cada una en cinco niveles, ordenados aleatoriamente utilizando metodología de superficie de respuesta (Response Surface Methodology). Las variables de amplitud fueron 72-93 % ( $X_1$ , %) y tiempo de 9-16 min ( $X_2$ , min), con un diseño de 13 tratamientos (Tabla 2), dentro de los cuales se obtuvieron 5 puntos centrales, 4 factoriales y 4 axiales. Los valores codificables de las variables independientes fueron  $-\alpha$ , -1, 0, +1,  $+\alpha$ . El análisis de regresión se realizó sobre datos de las variables dependientes obtenidas por triplicado, como observaciones llevadas a cabo mediante las condiciones de termoultrasonido y el valor medio de cada atributo se tomó como la respuesta ( $Y_i$ ).

Tabla 2. Diseño experimental

| Tratamiento | Modelo | X1: Amplitud (%) | X2: Tiempo (min) |
|-------------|--------|------------------|------------------|
| 1           | 00     | 83               | 12.5             |
| 2           | 0a     | 83               | 9.0              |
| 3           | 00     | 83               | 12.5             |
| 4           | 0A     | 93               | 12.5             |
| 5           | -+     | 75               | 15.0             |
| 6           | --     | 75               | 10.0             |
| 7           | +-     | 90               | 10.0             |
| 8           | 00     | 83               | 12.5             |
| 9           | ++     | 90               | 15.0             |
| 10          | a0     | 72               | 12.5             |
| 11          | 00     | 83               | 12.5             |
| 12          | 00     | 83               | 12.5             |
| 13          | 0A     | 83               | 16.0             |

\*Puntos centrales

Los datos se sometieron a un análisis de regresión lineal múltiple utilizando JMP 5.1 software estadístico (SAS Institute, Cary, NC, USA) y se ajustaron a un modelo polinomial de segundo orden mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 1: Cálculo del modelo polinomial

$$Y_j = \beta_0 + \sum_{i=1}^2 \beta_i X_i + \sum_{i=1}^2 \beta_{ii} X_i^2 + \sum_i \sum_{j=i+1} \beta_{ij} X_i X_j$$

$Y_i$  = respuesta prevista

$\beta_0$  = coeficiente constante

$\beta_i$  = Coeficiente lineal

$\beta_{ij}$  = coeficiente interactivo

$\beta_{ii}$  = coeficiente cuadrático

$X_i$  y  $X_j$  = variables independientes

Las determinaciones que se ajustaron al modelo matemático alcanzando  $R^2 \geq 0.90$  fueron interpretadas mediante la elaboración de figuras tridimensionales y de contorno para efectuar un traslape (SigmaPlot 12.3, Systat Software Inc) y

obtener la condición óptima del proceso de ultrasonido en la sopa crema de betabel.

La condición óptima se efectuó por triplicado y se comparó con el valor predicho obtenido, utilizando t-student ( $p < 0.05$ ) para dos muestras con el propósito de verificar la reproducibilidad (SPSS versión 25.0 para Windows).

## **7.6 Pasteurización de la sopa crema de betabel**

El proceso de obtención de la muestra por el método de pasteurización inició con el punto de ebullición del agua con la cebolla, el clavo y el laurel. Esta mezcla se agregó a la licuadora con el betabel blanqueado, la leche, pimienta blanca y sal.

La muestra entró a la celda de flujo a una temperatura de 8 °C enseguida de ser procesada y se le agregó el polvo de oca, el cual fue homogeneizado en vaso de precipitado de 25 mL, mientras que el baño de agua (Cole-Parmer Polystat, EE.UU) se programó a temperatura de 92 °C para que la muestra tuviera una temperatura de salida de 85 °C. Al llegar a la temperatura deseada, se contaron 15 segundos. La muestra se traspasó de manera inmediata a un Pirex estéril para iniciar el choque térmico, logrando una temperatura de 8 °C y posteriormente se almacenó para futuros análisis.

## **7.7 Propiedades fisicoquímicas**

### **7.7.1 pH**

El pH o potencial de hidrógeno cuantifica los iones de hidrógeno de una solución mediante una escala de 0 a 14 (ácido y alcalino), en la que se considera una escala de 7 como neutro (Badui, 2013). La sopa crema de betabel se midió con un potenciómetro digital (PH Meter, ROCA, PHS-3CU), utilizando 5 mL de muestra fresca.

### **7.7.2 Sólidos solubles totales (SST)**

La muestra se midió utilizando un refractómetro (Trading Co. Brix/ATC FG-113, Hangzhou Chican Trading Co., Ltd., China) y una gota de la muestra en fresco. Los resultados se expresaron como °Brix.

### **7.7.3 Acidez titulable**

El método se basa en determinar el volumen de solución de hidróxido de sodio (NaOH). Es el estándar necesario para neutralizar el ácido contenido en la muestra, determinando el punto final en mililitros gastados por medio del cambio de color, el cual se produce por la presencia del indicador fenolftaleína. Esta se determinó por el método de la AOAC (942.15, 1999). Se midió 1 mL de la muestra fresca y 9 mL de agua destilada en una probeta graduada, para pasar a un matraz Erlenmeyer. Se utilizaron 3 gotas del indicador fenolftaleína y se homogeneizó, después se comenzó a titular hasta observar un cambio de color. Se registraron los mililitros gastados de NaOH (0.1N) para neutralizar cada muestra.

La acidez titulable se expresó de acuerdo a la ecuación:

Ecuación 2: % Ácido cítrico

$$(V \times N \times 0.064M/1) \times 100$$

Dónde:

V = Volumen del hidróxido de sodio gastado (mL)

N = Normalidad de la solución de hidróxido de sodio (0.1N)

0.064 = Constante

M = Volumen de la muestra (mL)

### **7.7.4 Estabilidad física**

La estabilidad física se llevó a cabo con la determinación del porcentaje de sólidos sedimentados (Zafra-Rojas et al., 2013). Se utilizaron tubos de centrifuga de 15 mL, los cuales se pesaron en balanza analítica (ADAM, 1248031, USD) y se

anotaron los pesos. Se procedió a pesar 10 g de muestra fresca, después se centrifugó a 3000 rpm durante 30 minutos (Hamilton Bell, VanGuard V6500, EUA). Posteriormente, se decantó la muestra y el sedimento fue pesado. Se expresó como porcentaje de sólidos sedimentados (% SS), los cuales se calcularon empleando la siguiente fórmula:

Ecuación 3: Porcentaje de sólidos sedimentados

$$\text{SS (\%)} = (\text{Peso sedimento} / \text{peso de la muestra}) * 100$$

% SS = Porcentaje de sólidos sedimentados

Peso sedimento: peso en gramos de la muestra después de centrifugar

Peso de la muestra: peso en gramos de la muestra liofilizada

#### **7.7.5 Viscosidad**

La viscosidad se midió empleando la metodología descrita por Reyes-Buendía (2020), utilizando tubos de centrifuga de 50 mL. Se ocuparon 40 mL de muestra fresca y un viscosímetro (Brookfield DV3T, USA) con aguja de disco LV-04 a 20 rpm por 35 segundos. Los valores se expresaron en centipoise (cP).

#### **7.7.6 Color**

Para la determinación de color ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ , Hue y Croma), se colocaron 7 mL de muestra fresca en tapas de plástico de aproximadamente 3 cm de diámetro; estas se cubrieron con plástico para evitar derrame y obtener una precisión mayor en los resultados; los cuales fueron tomados con un colorímetro portátil (Minolta CM-80, 500 SM-508D, Japón). Se midió  $L^*$  (Luminosidad de color),  $a^*$  (coordenadas rojo/verde) y  $b^*$  (coordenadas amarillo/azul). Los valores obtenidos fueron utilizados para evaluar Hue ( $h^\circ$ ) y Croma ( $C^*$ ).

#### **7.8 Liofilización de la muestra**

La muestra se almacenó en bolsas herméticas y se congeló a una temperatura de  $-32\text{ }^\circ\text{C}$  y posteriormente fue liofilizada a 0.045 mBar a  $-52\text{ }^\circ\text{C}$  (LABCONCO,

FreeZone, EUA). Al término de la liofilización, lo obtenido se almacenó (-32 °C) hasta su uso posterior.

## **7.9 Propiedades funcionales**

### **7.9.1 Capacidad de retención de agua**

La capacidad de retención de agua (CRA), se realizó mediante el procedimiento referido por Symons y Brennan (2004). Se pesaron 500 mg de la muestra liofilizada en tubos de centrifuga con 10 mL de agua destilada y se dejaron reposar durante 24 horas a temperatura ambiente. Posteriormente, se centrifugó a 3000 rpm durante 20 minutos (Centrifuga Hamilton Beach Health-Smart, V6500, EUA). Los resultados se expresaron como gramos de agua (g/g bs) absorbidos por gramo de base seca de la muestra, de acuerdo a la siguiente ecuación:

Ecuación 4: Capacidad de retención de agua

$$CRA (g/g) = (P1-P0)/P0$$

Donde:

P0 = Peso de la muestra

P1 = Peso del sedimento

### **7.9.2 Capacidad de retención de lípidos**

La capacidad de retención de lípidos se llevó a cabo de acuerdo al procedimiento descrito por Femenia et al. (2006) y Symons y Brennan (2004) para CRA, sustituyendo agua por aceite de girasol. Esta se calculó con la siguiente ecuación:

Ecuación 5: Capacidad de retención de lípidos

$$CRL (g/g) = (P1-P0)/P0$$

Donde:

P0 = Peso de la muestra

P1 = Peso del sedimento

Los resultados se reportaron como gramos de aceite por gramo (g/g ps) de base seca de la muestra.

### **7.9.3 Capacidad de retención de glucosa**

Esta propiedad se realizó de acuerdo con el método referido por Ou et al. (2001) y Chau, Huang y Lee (2003). Se determinó el contenido de azúcares reductores mediante una solución de ácido 3,5-dinitrosalicílico (DNS) según el método Miller (1959). Se preparó el DNS, calentando 80 mL de agua a 35 °C en un matraz aforado a 100 mL. Después se agregó 1 g de DNS, 1 g de NaOH, 20 g de tartrato de sodio y 0.05 g de metabisulfito de sodio (cada uno por separado hasta su disolución). Cuando se llegó a 50 °C se adicionaron 0.2 g de fenol, se aforó a 100 mL y se dejó en ebullición (1 min). Finalmente, se enfrió a temperatura ambiente y se almacenó (16 h a 4 °C).

Se realizó una solución de glucosa a diferentes concentraciones para la curva patrón. Para ello, se pesaron 0.25 g de glucosa en 25 mL de agua destilada y se prepararon las siguientes concentraciones: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 10 mg/mL. Se aplicó la técnica de azúcares reductores, la cual consistió en tomar 30 µL de cada concentración, añadiendo 180 µL de DNS. Subsecuentemente, se homogeneizaron en vórtex y se colocó en ebullición (15 min), se dejó enfriar y se adicionaron 1230 µL de agua destilada. Se vertieron 200 µL en una microplaca y fue leída en un lector de microplacas (Power Wave XS UV-Biotek, software KC Junior, USA) a 540 nm. Cabe mencionar que se usó como blanco una mezcla de agua destilada y DNS.

Posteriormente, se pesaron 250 mg de muestra liofilizada en tubos de centrifuga de 15 mL, se añadieron 10 mL de solución glucosada previamente preparada y fue concentrada con una mezcla de 0.5 g de glucosa en 100 mL de agua destilada, y aparte se realizó un blanco (250 mg de muestra con 10 mL de agua destilada). Después la mezcla se llevó a incubación (Labtech, LSI-3016A, Korea) con agitación a 100 rpm durante 6 h a 37 °C. Al término de esto, se centrifugó (Hamilton Bell, VanGuard V6500, EUA) a 3500 rpm por 15 min. y se aplicó la técnica de azúcares reductores al sobrenadante.



Los resultados fueron expresados como miligramos de glucosa retenidos por gramo de peso seco de la muestra (mg/g).

#### **7.9.4 Capacidad de hinchamiento**

De acuerdo a Raghavendra et al. (2006), se pesaron 200 mg de muestra liofilizada en probetas graduadas de 10 mL, se agregaron 10 mL de agua destilada. Posteriormente, se mezclaron con una espátula y se dejaron en reposo durante 24 horas a temperatura ambiente. La capacidad de hinchamiento se determinó de acuerdo a la siguiente ecuación:

Ecuación 6: Capacidad de hinchamiento

$$CH \text{ (mL/g)} = V1 - V0/\text{peso de la muestra}$$

Donde:

V0 = Volumen inicial de la muestra

V1 = Volumen final de la muestra

Los resultados se expresaron como mililitros de agua por gramo de muestra en base seca (mL/g bs).

#### **7.9.5 Capacidad emulsificante**

La capacidad emulsificante (CE), se determinó de acuerdo al método aplicado por Temelli (1997). Se pesaron 0.5 g de muestra liofilizada, se añadieron 5 mL de agua destilada en tubos de centrifuga tipo Falcon de 50 mL y estos se incubaron en un baño de agua a 35 °C durante 20 min. Después, se añadieron 7.5 mL de aceite de girasol y se homogeneizó la mezcla a 1500 rpm durante 1 minuto. Posteriormente, se transfirió a tubos de centrifuga graduados de 50 mL y se centrifugó a 3500 rpm (Centrifuga Hamilton Beach Health-Smart, V6500, EUA) durante 25 minutos a temperatura ambiente. Posteriormente, se midió el volumen final de la emulsión, la cual fue expresada como porcentaje, utilizando la ecuación:

Ecuación 7: Capacidad emulsificante

$$CE (\%) = (V1-V0)/V1 \times 100$$

Donde:

V1= Volumen inicial

V0= Volumen final

## **7.10 Extracción de compuestos antioxidantes**

Previo a la determinación de compuestos antioxidantes, se realizó una extracción descrita por Tyagi et al. (2021), con ligeras modificaciones. Se pesaron 2 g de muestra liofilizada y se agregaron 10 mL de etanol en un tubo de centrifuga de 25 mL. Se homogeneizaron en vórtex y se centrifugaron a 4000 rpm a 4 °C durante 20 min (Beckman Coulter, Allegra 25R, EUA). El sobrenadante obtenido se almacenó en viales y se mantuvieron en congelación para su posterior análisis de compuestos antioxidantes.

## **7.11 Determinación de compuestos antioxidantes**

### **7.11.1 Betalaínas**

El contenido de betalaínas se estableció mediante el método de Stinzinger et al. (2005), realizando diluciones (1:10, 1:20 y 1:50) con agua destilada, además de una muestra sin diluir y un blanco de agua destilada. Se agregaron 200 µL a microplaca para llevar a cabo una lectura a 538 nm y 480 nm en un espectrofotómetro de microplacas (Power Wave XS UV-Biotek, software KC Junior, USA). Las betaxantinas se expresaron como indicaxantinas y las betaninas como betalaínas y la absorbancia se obtuvo para calcular el contenido de betalaínas utilizando la siguiente ecuación:

Ecuación 8: Contenido de betalaínas

$$EB (\text{mg/g}) = (A_{x\text{FD}} \times P \times M \times V) / (\epsilon \times P \times L)$$

Donde:

B = Concentración de betacianinas y betaxantinas

A = Absorbancia

FD = Factor de dilución

PM = Peso molecular (550 g/mol para betaninas y 308 g/mol para betaxantinas)

V = Volumen del extracto (mL)

$\epsilon$  = Coeficiente de extinción molar (60,000 L/(mol/cm)) para betaninas y (48,000 L (mol/cm)) para betaxantinas

P = Peso de la muestra (g)

L= Longitud de la celda (0.52 cm<sup>3</sup>)

El contenido de betaninas y betaxantinas se expresaron como miligramos equivalentes de betalaínas por 100 gramos en base seca (mg EB/100 g bs).

#### **7.11.2 Contenido fenólico total**

El procedimiento utilizado fue mediante Folin-Ciocalteu que cuantifica los compuestos fenólicos totales (CFT), los cuales reaccionan con el reactivo de Folin-Ciocalteu a pH básico (Cicco et al., 2009). Se preparó una solución de Folin-Ciocalteu en una concentración de 1:10, una solución de carbonato de sodio al 7.5% y la solución de ácido gálico (AG) (15 mg en 50 mL de agua destilada). Se realizó una curva estándar de AG de 0, 100, 200 y 300 mg/L, utilizando como blanco agua destilada. Se tomaron 100  $\mu$ L de muestra de cada tratamiento, se les añadió 500  $\mu$ L de la solución de Folin-Ciocalteu, 400  $\mu$ L de carbonato de sodio y se dejaron en reposo durante 30 min. Se agregaron 200  $\mu$ L en microplaca y se tomó la lectura a 765 nm en un espectrofotómetro de microplacas (Power Wave XS UV-Biotek, Software KC Junior, USA). Los resultados se expresaron como miligramos equivalentes de ácido gálico por 100 gramos en base seca (mg EAG/100 g bs).

## **7.12 Capacidad antioxidante**

### **7.12.1 ABTS**

La técnica aplicada fue de acuerdo a Kuskoski et al. (2005). Se preparó el reactivo ABTS (76.8 mg en 20 mL de agua destilada) 7 mmol y persulfato de potasio (6.6 mg en 10 mL de agua destilada) 2.45 mmol, en condiciones de absoluta oscuridad y refrigeración durante 16 h. Después la mezcla se diluyó en etanol hasta obtener una lectura de absorbancia de  $0.7 \pm 0.1$  a 754 nm. Se realizó una curva estándar en concentraciones de 0, 5, 10, 20, 30, 40 y 50  $\mu\text{mol/L}$  con una solución de Trolox (3.75 mg en 50 mL) y fue leído en un espectrofotómetro de microplacas (Power Wave XS UV-Biotek, Software KC Junior, USA), utilizando como blanco etanol para la curva y agua destilada para muestras. Se tomaron 100  $\mu\text{L}$  de la muestra y se adicionaron 900  $\mu\text{L}$  de ABTS, se dejaron en reposo durante 7 min. Se agregaron 200  $\mu\text{L}$  en una microplaca y se hizo una lectura a 754 nm. Finalmente, los resultados se expresaron en micromoles equivalentes de Trolox por 100 mL ( $\mu\text{mol ET}/100 \text{ mL}$ ).

### **7.12.2 DPPH**

La metodología fue aplicada de acuerdo a Morales y Jiménez-Pérez (2001). Se preparó una solución con 7.4 mg de DPPH en 100 mL de etanol. Posteriormente, se elaboró una curva estándar con Trolox (3.75 mg en 50 mL de etanol), con las concentraciones 0, 50, 100, 200 y 300  $\mu\text{mol ET/L}$ . Se leyó en un espectrofotómetro de microplacas (Power Wave XS UV-Biotek, Software KC Junior, USA). Se colocaron 100  $\mu\text{L}$  de la muestra y 500  $\mu\text{L}$  de la solución de DPPH y se dejó reposar durante 60 minutos. Se vaciaron 200  $\mu\text{L}$  en microplaca y se midió a una absorbancia de 520 nm. La capacidad antioxidante se expresó en micromoles equivalentes de Trolox en 100 gramos de base seca ( $\mu\text{mol ET}/100 \text{ g bs}$ ).

### **7.12.3 FRAP**

La capacidad antioxidante de reducción férrica (FRAP), se llevó a cabo mediante la metodología por Thaipong et al. (2006). Se realizó la preparación del reactivo

FRAP en una concentración 10:1:1. Para ello se mezclaron 100 mL de solución amortiguador (0.3 M a pH 3.6), 10 mL de 2,4,6-tris(2-pyridyl)-s-triazine (TPTZ), (10 Mm en HCl) y 10 mL de FeCl<sub>3</sub> (20 mM en agua destilada). Para la curva patrón se utilizó sulfato ferroso a concentraciones de 0, 20, 30, 40 y 50 µmol Fe(II)/L. Las muestras (30 µL) se colocaron en viales, se agregaron 90 µL de agua destilada y 900 µL del reactivo de FRAP. Posteriormente, se homogeneizaron en vórtex y se dejaron en baño de agua (Thermo electron corporation precisión, modelo 2837, EUA) a 37 °C por un periodo de 10 min. Se utilizaron 200 µL en microplaca para efectuar la lectura en espectrofotómetro (Power Wave XS UV-Biotek, Software KC Junior, USA) a 593 nm y los resultados se expresaron como micromoles de hierro en 100 gramos en base seca (µmol Fe (II)/100 g bs).

### **7.13 Bioaccesibilidad *in vitro* de antioxidantes**

En la técnica de bioaccesibilidad se utilizó el modelo de digestión *in vitro* descrito por Trinidad, Wolever y Thompson (1996), con modificaciones de acuerdo a Ramírez-Moreno et al. (2018). Se basa en una fase inicial de simulación de digestión intraluminal, seguida por una fase de diálisis, que simula la absorción intestinal.

Se pesaron 500 mg de muestra liofilizada en tubos de centrífuga de 50 mL, se adicionaron 20 mL de agua destilada, se mezcló en vórtex y se ajustó el pH a 2 con HCl 6 M. Después se agregaron 120 µL de pepsina (40 mg en 1mL de HCl 0.1 M), se agitó en vórtex y se colocaron en la incubadora (Labtech, LSI-3016A, Korea) con agitación a 60 rpm durante 2 h 37 °C. Después, se añadieron 1.5 mL de solución bilis-pancreatina (5 mg de pancreatina, 12.5 mg de colato de sodio y 12.5 mg de desoxicolato de sodio en 1 mL de NaHCO<sub>3</sub> 0.1 M) y se homogeneizó en vórtex. La mezcla se colocó en membranas de diálisis (tamaño de corte de 12 kDa) de 15 cm de longitud. Previamente, las membranas se sumergieron en agua en ebullición para su ablandamiento y fácil manipulación. Posteriormente, se colocaron en frascos de 500 mL para llevar a cabo la diálisis en una solución de NaHCO<sub>3</sub> (0.025 M, a pH 7) para ser incubadas (Labtech, LSI-3016A, Korea) en agitación lenta (60 rpm a 37 °C) durante 16 h.

Finalmente, la fracción bioaccesible se almacenó en viales para determinar compuestos antioxidantes (betalainas y contenido fenólico total) y su capacidad antioxidante (ABTS, DPPH y FRAP), acorde a las metodologías descritas anteriormente. La bioaccesibilidad intestinal de los compuestos y su capacidad antioxidante de las muestras se determinaron como la diferencia de sus parámetros antes y después de la digestión *in vitro*.

#### **7.14 Análisis estadístico**

La muestra con la condición óptima de proceso, la muestra pasteurizada y un control se realizaron por triplicado y se compararon, por medio de un análisis unidireccional de varianza (ANOVA). La comparación de las diferencias entre las medias  $\pm$  desviación estándar (DE) se realizó con una prueba de Duncan a un nivel de significancia  $p < 0.05$  utilizando el paquete estadístico SPSS versión 15.0, Sistema SPSS para Windows (SPSS INC, Chicago, Illinois).

### **8. Resultados y discusión**

#### **8.1 Propiedades fisicoquímicas**

Para la determinación de propiedades fisicoquímicas en sopa crema de betabel termosonicada se midió pH, sólidos solubles totales (SST), acidez titulable y estabilidad física (Tabla 3). Los resultados de pH mostraron un rango entre 6.07 y 6.73, los cuales fueron similares a lo reportado por Reyes-Buendía et al. (2020), en una sopa crema con mucílago de nopal (6.09 a 6.32). En sólidos solubles totales y acidez titulable, se obtuvieron datos de 9 a 9.5 °Brix y 0.2 a 0.5 % de ácido cítrico, respectivamente. Cabe mencionar que hasta el momento no existen estudios parecidos a la presente investigación. Sin embargo, en otras matrices como en jugo de naranja sonicado, los SST estuvieron entre 9.12 y 9.34 °Brix (Guevara-Mojica, 2020). La estabilidad física osciló entre 56.60 y 71.10%. Es importante remarcar que cada una de las determinaciones se ajustaron al modelo matemático, ya que obtuvieron una  $R^2 \geq 0.90$ .

Tabla 3. Efecto de termosonicación sobre pH, sólidos solubles totales, acidez titulable y estabilidad física en sopa crema de betabel

| Tratamiento (%Amplitud/min) | pH          | Sólidos solubles totales (°Brix) | Acidez titulable (% ácido cítrico) | Estabilidad (% de sólidos sedimentados) |
|-----------------------------|-------------|----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------|
| 83%/12.5min                 | 6.07 ± 0.04 | 9.2 ± 0.00                       | 0.3 ± 0.00                         | 63.94 ± 4.85                            |
| 83%/9min                    | 6.55 ± 0.01 | 9.1 ± 0.00                       | 0.3 ± 0.00                         | 60.20 ± 9.54                            |
| 83%/12.5min                 | 6.73 ± 0.01 | 9.1 ± 0.00                       | 0.3 ± 0.03                         | 63.76 ± 1.73                            |
| 93%/12.5min                 | 6.69 ± 0.09 | 9.0 ± 0.00                       | 0.2 ± 0.06                         | 71.10 ± 0.26                            |
| 75%/15min                   | 6.61 ± 0.02 | 9.0 ± 0.00                       | 0.2 ± 0.03                         | 65.46 ± 2.55                            |
| 75%/10min                   | 6.68 ± 0.17 | 9.1 ± 0.00                       | 0.5 ± 0.03                         | 56.60 ± 1.77                            |
| 90%/10min                   | 6.65 ± 0.03 | 9.5 ± 0.00                       | 0.2 ± 0.03                         | 65.93 ± 0.60                            |
| 83%/12.5min                 | 6.69 ± 0.02 | 9.0 ± 0.00                       | 0.3 ± 0.00                         | 63.52 ± 3.75                            |
| 90%/15min                   | 6.69 ± 0.02 | 9.5 ± 0.00                       | 0.3 ± 0.03                         | 64.60 ± 1.20                            |
| 72%/12.5min                 | 6.65 ± 0.00 | 9.1 ± 0.00                       | 0.3 ± 0.00                         | 61.95 ± 1.67                            |
| 83%/12.5min                 | 6.69 ± 0.02 | 9.0 ± 0.00                       | 0.3 ± 0.00                         | 63.96 ± 4.73                            |
| 83%/12.5min                 | 6.69 ± 0.01 | 9.0 ± 0.12                       | 0.3 ± 0.03                         | 63.71 ± 1.61                            |
| 83%/16min                   | 6.73 ± 0.00 | 9.0 ± 0.00                       | 0.2 ± 0.03                         | 65.43 ± 0.73                            |
| <b>R<sup>2</sup></b>        | 0.90        | 0.99                             | 0.96                               | 0.94                                    |

### 8.1.1 Color

Las características colorimétricas de la sopa crema de betabel termosonicada, obtenidas a partir de las coordenadas  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$ , así como en  $h^\circ$  (tonalidad) y  $C^*$  (saturación) se pueden observar en la tabla 4. En la coordenada  $L^*$ , los tratamientos alcanzaron valores de 32.64 a 37.59, mientras que para  $a^*$  y  $b^*$  fueron de 12.14 a 30.08 y de 0.66 a 2.07, respectivamente. Todas las muestras exhibieron valores de  $a^*$  y  $b^*$  positivos, ubicándolas en el cuadrante rojo – amarillo (Figura 4A y C). Respecto a la tonalidad y saturación de color, presentaron valores entre 1.53 y 7.16 y entre 12.28 y 28.84. Los parámetros que alcanzaron una  $R^2 \geq 0.90$  fueron las coordenadas  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $h^\circ$  y  $C^*$ . Este comportamiento fue similar a un jugo de betabel termosonicado, donde la mayoría de los tratamientos se encontraron en el mismo cuadrante (Ramírez-Melo et al., 2022). En los 13 tratamientos se visualizó un patrón opuesto. Esto es debido a la variación de amplitud y tiempo, ya que al aplicar las condiciones, varía la temperatura y sucede una degradación del color (Rocha y Noreña, 2020). También la aplicación de ultrasonido ha demostrado ser una técnica útil para reducir la actividad de la enzima polifenol oxidasa (PPO) en frutas y verduras (Fernandes et al., 2021). Por lo anterior el comportamiento diferente en color en el presente estudio, podrían deberse a la actividad de la inactivación de PPO como resultado de la cavitación

acústica, que a su vez aumenta la presión y la temperatura localizada, además de aumentar el esfuerzo de corte, lo que resulta en cambios en las estructuras secundarias y terciarias de la enzima (Bot et al., 2018).

Tabla 4. Efecto del tratamiento por termosonicación sobre los parámetros de color en sopa crema de betabel

| Tratamiento<br>(%Amplitud/min) | $L^*$        | $a^*$        | $b^*$       | $h^\circ$   | $C^*$        |
|--------------------------------|--------------|--------------|-------------|-------------|--------------|
| 83%/12.5min                    | 35.04 ± 0.10 | 24.73 ± 0.02 | 2.05 ± 0.01 | 4.78 ± 0.01 | 24.76 ± 0.12 |
| 83%/9min                       | 33.64 ± 0.04 | 24.95 ± 0.04 | 2.07 ± 0.01 | 5.11 ± 0.01 | 25.64 ± 0.04 |
| 83%/12.5min                    | 35.17 ± 0.06 | 25.77 ± 0.08 | 2.03 ± 0.01 | 4.51 ± 0.02 | 24.44 ± 0.37 |
| 93%/12.5min                    | 35.44 ± 0.27 | 22.81 ± 0.96 | 1.30 ± 0.93 | 5.95 ± 0.52 | 21.71 ± 0.36 |
| 75%/15min                      | 36.03 ± 0.14 | 28.72 ± 2.04 | 0.66 ± 0.04 | 1.53 ± 0.17 | 28.78 ± 2.04 |
| 75%/10min                      | 35.22 ± 1.64 | 24.18 ± 0.29 | 2.52 ± 0.04 | 5.91 ± 0.19 | 24.14 ± 0.00 |
| 90%/10min                      | 34.44 ± 3.62 | 29.07 ± 0.44 | 1.09 ± 0.37 | 4.43 ± 3.92 | 28.84 ± 0.20 |
| 83%/12.5min                    | 36.22 ± 2.84 | 23.76 ± 0.22 | 1.63 ± 0.11 | 3.63 ± 0.05 | 23.80 ± 0.22 |
| 90%/15min                      | 32.36 ± 0.03 | 12.14 ± 0.07 | 1.60 ± 0.17 | 7.16 ± 0.06 | 12.28 ± 0.14 |
| 72%/12.5min                    | 37.59 ± 0.10 | 30.08 ± 2.40 | 1.60 ± 0.80 | 2.10 ± 1.19 | 26.63 ± 0.31 |
| 83%/12.5min                    | 37.28 ± 0.03 | 26.02 ± 3.10 | 1.41 ± 0.02 | 4.13 ± 2.33 | 26.12 ± 3.00 |
| 83%/12.5min                    | 37.17 ± 0.15 | 26.32 ± 0.17 | 1.69 ± 0.03 | 3.67 ± 0.08 | 26.37 ± 0.17 |
| 83%/16min                      | 32.64 ± 1.38 | 22.79 ± 0.13 | 0.87 ± 0.04 | 3.15 ± 1.09 | 22.80 ± 0.14 |
| <b>R<sup>2</sup></b>           | 0.85         | 0.91         | 0.90        | 0.92        | 0.91         |

± Desviación estándar



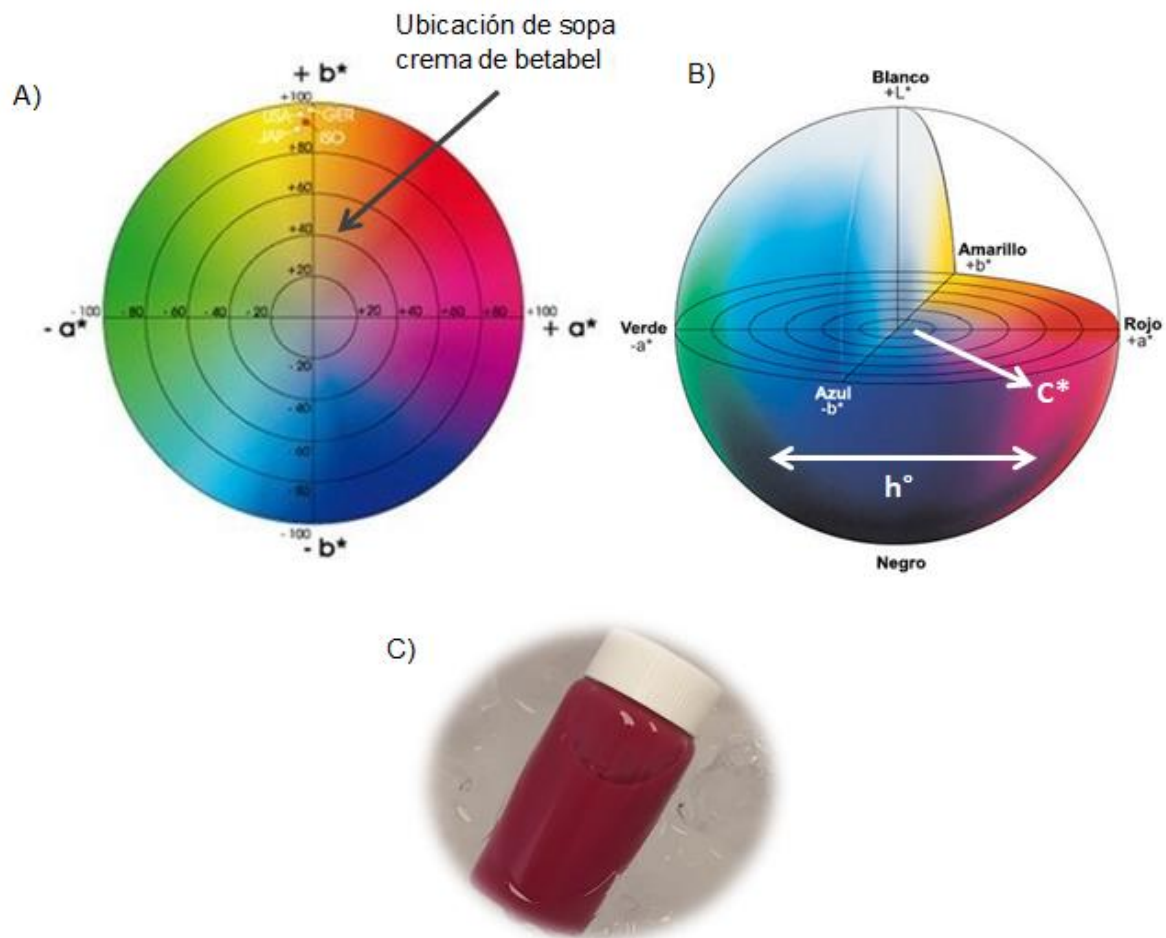


Figura 4. Escala de color CIE  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ , hue ( $h^\circ$ ) y croma ( $C^*$ ) muestra de sopa crema de betabel

De acuerdo a los resultados de coeficiente de regresión (Tabla 5), se observa que la interacción del término de amplitud y tiempo ( $\beta_{12}$ ), fue la que tuvo una influencia significativa ( $p < 0.001$ ) para las coordenadas  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $h^\circ$  y  $C^*$ . Esto se puede apreciar en las figuras tridimensionales (Figura 5). Al disminuir el tiempo y la amplitud, hay valores menores en  $L^*$  (Figura 5A). En la coordenada  $b^*$  (Figura 5B) al aumentar amplitud y tiempo, se mostraron menores efectos. En la tonalidad ( $h^\circ$ ), al aumentar amplitud y tiempo, incrementó este parámetro y para  $C^*$ , al disminuir la amplitud y tiempo, los resultados presentaron una disminución (Figura 5E). Un comportamiento similar se observó en los ejes  $a^*$  y  $b^*$ , así como en  $C^*$  en un jugo de cerezas, en el que influyó la interacción de amplitud y el tiempo de tratamiento, pero a un nivel de significancia de  $p < 0.05$ , mientras que en  $h^\circ$  se obtuvo una  $p < 0.01$  (Türken & Erge, 2017).

Tabla 5. Coeficiente de regresión y ANOVA de los parámetros del modelo cuadrático de predicción de superficie de respuesta de las variables color

| Coeficiente                      | $L^*$              | $a^*$              | $b^*$              | $h^\circ$          | $C^*$              |
|----------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| $\beta_0$ (Intercepto)           | 36.17 <sup>a</sup> | 32.74 <sup>a</sup> | 18.51 <sup>a</sup> | 16.10 <sup>a</sup> | 35.02 <sup>a</sup> |
| $\beta_1$ (amplitud)             | -3.14              | -4.49 <sup>c</sup> | -1.52              | 5.89 <sup>b</sup>  | -4.14 <sup>c</sup> |
| $\beta_2$ (tiempo)               | -1.13              | -3.16 <sup>c</sup> | -5.06 <sup>b</sup> | -2.72 <sup>d</sup> | -3.33 <sup>c</sup> |
| $\beta_{12}$ (amplitud*tiempo)   | -1.72              | -6.21 <sup>b</sup> | 5.57 <sup>b</sup>  | 6.18 <sup>b</sup>  | -6.62 <sup>b</sup> |
| $\beta_{11}$ (amplitud*amplitud) | 0.28               | 0.24               | -1.91              | 0.51               | -0.98              |
| $\beta_{22}$ (tiempo*tiempo)     | -5.00 <sup>b</sup> | -1.73              | -1.79              | 0.75               | -1.19              |

Niveles de significancia: <sup>a</sup>p<0.0001; <sup>b</sup>p<0.001; <sup>c</sup>p<0.01; <sup>d</sup>p<0.05

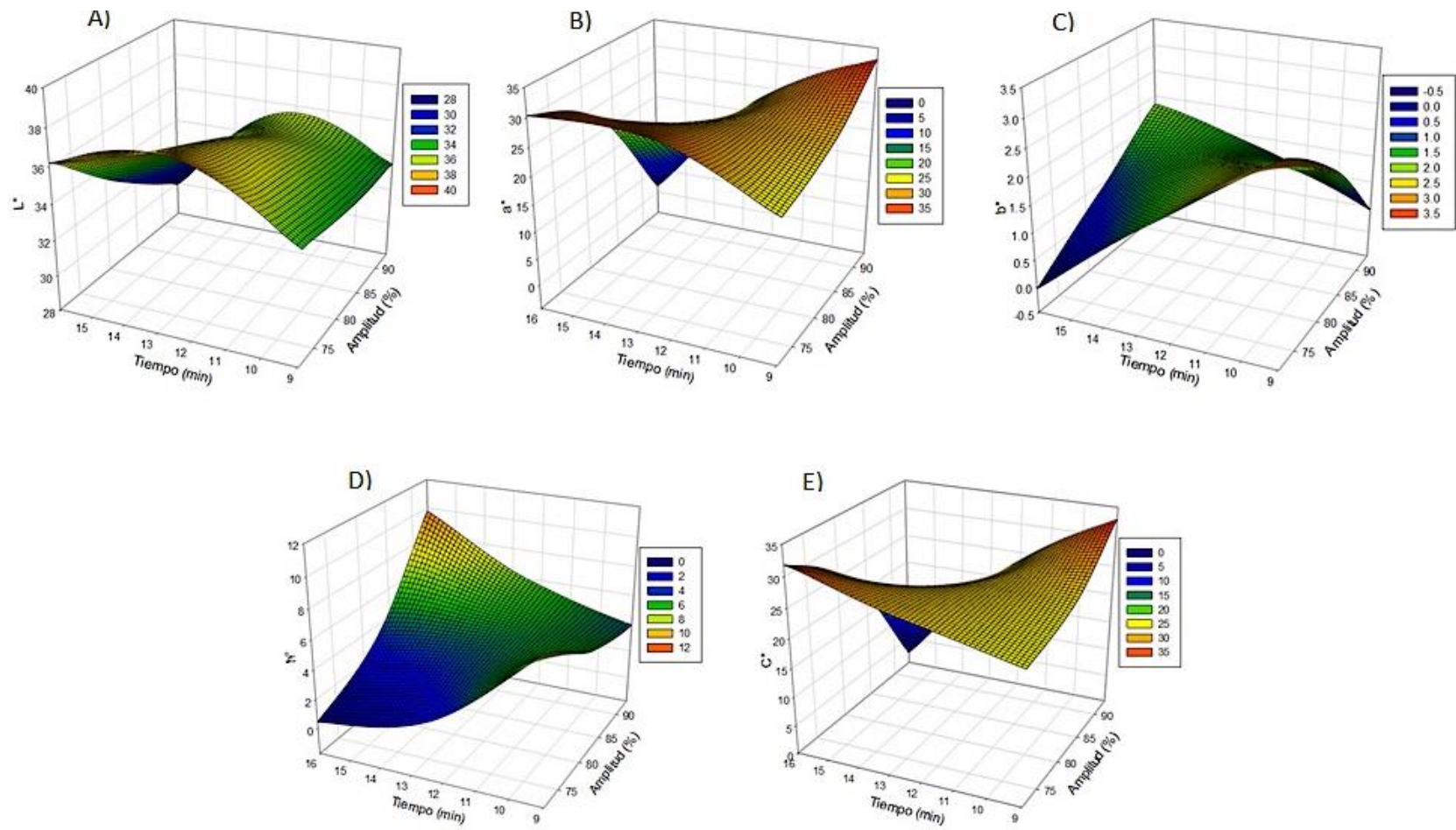


Figura 5. Efecto de la termosonicación sobre los parámetros de  $L^*$  (A),  $a^*$  (B),  $b^*$  (C),  $h^\circ$  (D) y  $C^*$  (E) de sopa crema de betabel

### 8.1.2 Viscosidad y propiedades funcionales de sopa crema de betabel

En la sopa crema de betabel termosonicada se midieron parámetros de viscosidad y propiedades funcionales como capacidad de retención de agua (CRA), capacidad de retención de lípidos (CRL), capacidad de retención de glucosa (CRG), capacidad de hinchamiento (CH) y capacidad emulsificante (CE) (Tabla 6). Los rangos de viscosidad fueron de 240 a 400 cP, en CRA se obtuvieron valores de 0.71 a 0.83 g/g, de 0.63 a 0.69 g/g en CRL, de 4.52 a 36.05 mg/g en CRG, de 8.67 a 37.16 mL/g en CH y CE de 72.36 a 94.01 mL/g. Las determinaciones antes mencionadas se ajustaron al modelo matemático, obteniendo una  $R^2 \geq 0.90$  a excepción de CH, el cual tuvo una  $R^2$  de 0.85 (Tabla 6).

La tabla 7 presenta el coeficiente de regresión lineal de los parámetros ajustados. Para viscosidad, el término lineal de amplitud ( $\beta_1$ ) influyó significativamente ( $p < 0.0001$ ). En la figura 6A se puede apreciar que a mayor tratamiento de amplitud hubo menor viscosidad. También en CRA, la amplitud ( $\beta_1$ ) influyó de manera significativa pero a  $p < 0.0001$  (Tabla 7), en donde se muestra que al incrementar la amplitud, existió menor capacidad de retención de agua (Figura 6B). La CRL se vio afectada por el término cuadrático de amplitud ( $\beta_{11}$ ) con una  $p < 0.0001$  (Tabla 7). Se puede visualizar que la aplicación de amplitudes intermedias (80-85%) proporcionó una mayor CRL (Figura 6C). En CRG, se mostró un impacto significativo ( $p < 0.0001$ ) en el cuadrático de amplitud ( $\beta_{11}$ ) (Tabla 7), ya que al aplicar mayor amplitud, hubo más capacidad para la absorción de glucosa (Figura 6D). Para CH, afectó el tiempo en su forma lineal ( $\beta_2$ ), así como la interacción entre la temperatura y el tiempo ( $\beta_{12}$ ), los cuales influyeron significativamente a una  $p < 0.01$ . Esto se puede observar en la figura 6E, en donde se aprecia una disminución de la capacidad de hinchamiento cuando se sometió a mayor tiempo y amplitudes intermedias. Por último, la capacidad emulsificante se vio influenciada significativamente por el cuadrático del tiempo ( $p < 0.0001$ ) ( $\beta_{22}$ ), indicando que entre los 12 y 13 minutos existió una mayor CE de la sopa crema de betabel termosonicada (Figura 6F).

Tabla 6. Efecto del tratamiento de termosonicación sobre la viscosidad y propiedades funcionales de la sopa crema de betabel

| Tratamiento<br>(%Amplitud/min) | Viscosidad<br>(cP) | Capacidad de<br>retención de<br>Agua (g/g) | Capacidad de<br>retención de<br>Lípidos (g/g) | Capacidad de<br>retención de<br>glucosa (mg/g) | Capacidad de<br>hinchamiento<br>(mL/g) | Capacidad<br>emulsificante<br>(mL/g) |
|--------------------------------|--------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------|
| 83%/12.5min                    | 330 ± 0.00         | 0.83 ± 0.03                                | 0.68 ± 0.03                                   | 16.93 ± 7.44                                   | 10.50 ± 0.86                           | 89.87 ± 3.70                         |
| 83%/9min                       | 240 ± 0.00         | 0.81 ± 0.02                                | 0.67 ± 0.00                                   | 7.80 ± 7.47                                    | 21.99 ± 0.01                           | 78.88 ± 5.22                         |
| 83%/12.5min                    | 330 ± 0.00         | 0.79 ± 0.02                                | 0.68 ± 0.04                                   | 18.32 ± 2.15                                   | 8.67 ± 0.58                            | 92.86 ± 0.00                         |
| 93%/12.5min                    | 240 ± 0.00         | 0.76 ± 0.05                                | 0.63 ± 0.01                                   | 28.91 ± 6.36                                   | 29.16 ± 2.89                           | 83.55 ± 2.83                         |
| 75%/15min                      | 400 ± 0.00         | 0.78 ± 0.00                                | 0.63 ± 0.02                                   | 24.67 ± 18.84                                  | 12.00 ± 0.86                           | 82.56 ± 0.44                         |
| 75%/10min                      | 340 ± 14.1         | 0.82 ± 0.00                                | 0.69 ± 0.02                                   | 19.15 ± 1.00                                   | 37.16 ± 2.30                           | 93.09 ± 0.34                         |
| 90%/10min                      | 290 ± 11.5         | 0.71 ± 0.09                                | 0.64 ± 0.17                                   | 21.21 ± 12.83                                  | 11.16 ± 1.15                           | 80.05 ± 0.84                         |
| 83%/12.5min                    | 360 ± 0.00         | 0.78 ± 0.01                                | 0.68 ± 0.03                                   | 15.46 ± 8.17                                   | 8.67 ± 0.29                            | 94.01 ± 0.51                         |
| 90%/15min                      | 290 ± 17.3         | 0.77 ± 0.01                                | 0.65 ± 0.00                                   | 14.25 ± 8.20                                   | 12.70 ± 0.29                           | 85.56 ± 0.34                         |
| 72%/12.5min                    | 350 ± 17.3         | 0.83 ± 0.02                                | 0.64 ± 0.06                                   | 36.05 ± 2.44                                   | 13.00 ± 0.87                           | 90.12 ± 0.48                         |
| 83%/12.5min                    | 360 ± 0.00         | 0.81 ± 0.00                                | 0.68 ± 0.02                                   | 17.13 ± 12.49                                  | 11.50 ± 0.87                           | 93.27 ± 0.42                         |
| 83%/12.5min                    | 340 ± 17.3         | 0.79 ± 0.01                                | 0.67 ± 0.08                                   | 15.85 ± 9.64                                   | 10.67 ± 0.58                           | 93.33 ± 0.00                         |
| 83%/16min                      | 390 ± 0.00         | 0.77 ± 0.00                                | 0.66 ± 0.01                                   | 4.52 ± 3.65                                    | 15.33 ± 1.15                           | 72.36 ± 1.41                         |
| <b>R<sup>2</sup></b>           | 0.92               | 0.90                                       | 0.95                                          | 0.99                                           | 0.85                                   | 0.92                                 |

±: desviación estándar. cP (centipoises); g/g (gramos por gramo); mg/g (miligramo por gramo); mL/g (mililitro por gramo)

Tabla 7. Coeficiente y ANOVA de los parámetros del modelo cuadrático de predicción de superficie de respuesta de viscosidad y propiedades funcionales de sopa crema de betabel termosonicada

| Coeficiente                      | Viscosidad          | CRA                | CRL                | CRG                 | CH                 | CE                 |
|----------------------------------|---------------------|--------------------|--------------------|---------------------|--------------------|--------------------|
| $\beta_0$ (Intercepto)           | 334 <sup>a</sup>    | 0.79 <sup>a</sup>  | 0.67 <sup>a</sup>  | 16.73 <sup>a</sup>  | 17.65 <sup>a</sup> | 92.66 <sup>a</sup> |
| $\beta_1$ (amplitud)             | -31.12 <sup>a</sup> | -0.02 <sup>a</sup> | -0.00 <sup>c</sup> | -6.40 <sup>b</sup>  | -1.67              | -2.45 <sup>d</sup> |
| $\beta_2$ (tiempo)               | 10.57 <sup>c</sup>  | -0.00              | -0.00 <sup>c</sup> | -2.11               | -3.97 <sup>c</sup> | -2.09              |
| $\beta_{12}$ (amplitud*tiempo)   | -17.5 <sup>b</sup>  | 0.01 <sup>c</sup>  | -0.01 <sup>b</sup> | -6.12 <sup>b</sup>  | 4.67 <sup>c</sup>  | 3.34 <sup>c</sup>  |
| $\beta_{11}$ (amplitud*amplitud) | -0.25               | -0.00              | -0.02 <sup>a</sup> | 20.69 <sup>a</sup>  | 0.63               | -1.68              |
| $\beta_{22}$ (tiempo*tiempo)     | -5.125 <sup>d</sup> | -0.01 <sup>c</sup> | -0.00              | -13.36 <sup>a</sup> | -0.53              | -8.38 <sup>a</sup> |

Niveles de significancia: <sup>a</sup>p<0.0001; <sup>b</sup>p<0.001; <sup>c</sup>p<0.01; <sup>d</sup>p<0.05. \*CRA Capacidad de retención de agua, \*CRL Capacidad de retención de lípidos, \*CRG Capacidad de retención de glucosa, \*CH Capacidad de hinchamiento, \*CE Capacidad emulsificante

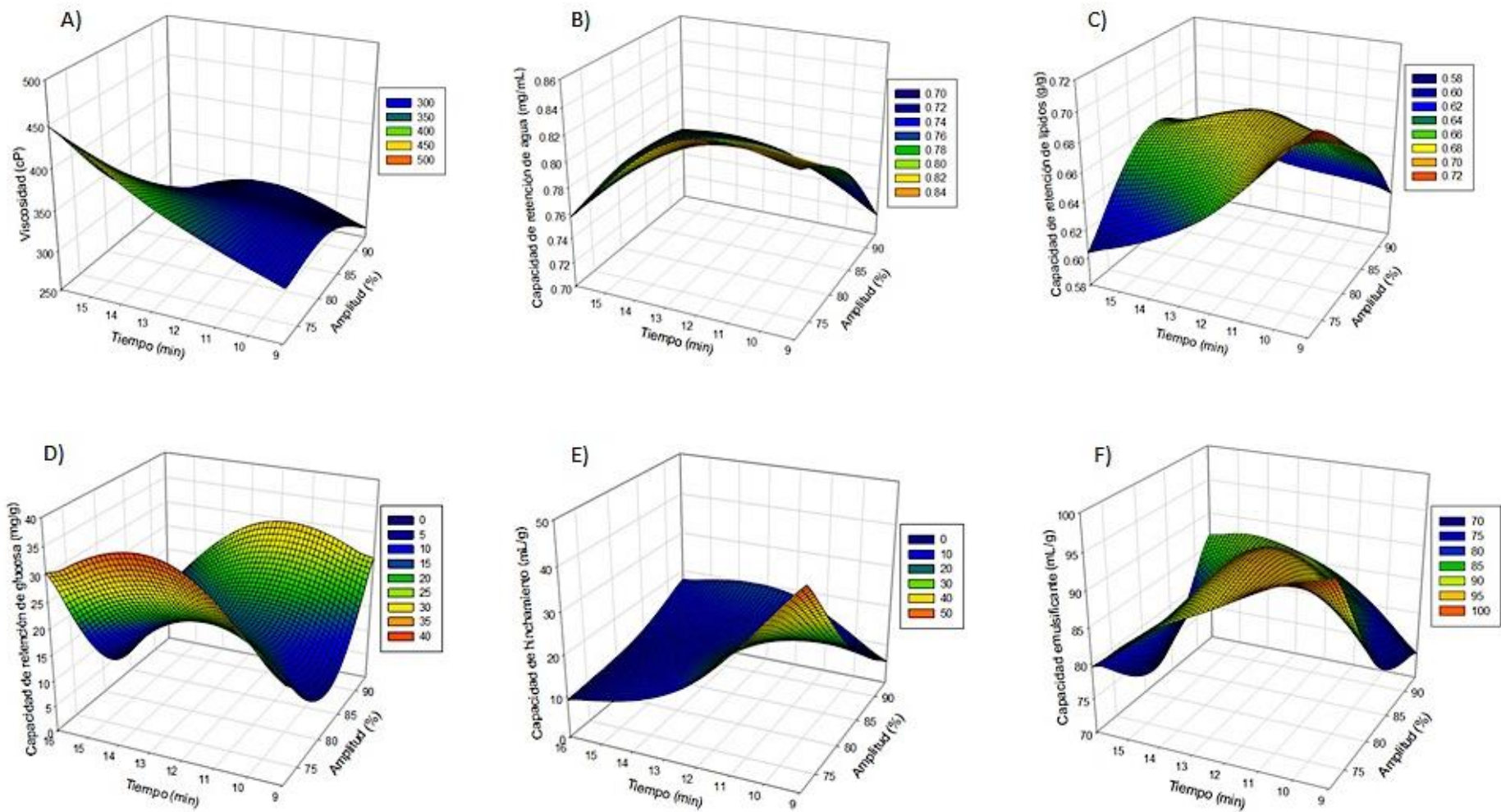


Figura 6. Efecto de termosonicación sobre viscosidad (A), capacidad de retención de agua (B), capacidad de retención de lípidos (C), capacidad de retención de glucosa (D), capacidad de hinchamiento y capacidad emulsificante (F) de la sopa crema de betabel.

## 8.2 Compuestos antioxidantes

### 8.2.1 Betalaínas

Los resultados de contenido de betalainas se muestran en la tabla 8. El contenido de betaninas y betaxantinas fue entre 25.93 y 108.26 mg EB/100 g bs y entre 18.93 y 62.13 mg EI/100 g bs, obteniendo  $R^2$  de 0.91 y 0.90, respectivamente. Como se mencionó anteriormente, no hay reportes sobre estudios de sopa crema termosonicada. Sin embargo, comparando con otras matrices, los valores fueron mayores a lo reportado por Ramírez-Melo et al. (2022) en un jugo de betabel termosonicado.

De acuerdo al coeficiente de regresión (Tabla 9), el término cuadrático de amplitud ( $\beta_{11}$ ), fue el que influyó sobre el contenido de betaninas y betaxantinas ( $p < 0.001$  y  $p < 0.01$ , respectivamente). Lo anterior se distingue en la figura 7A y 7B, que a mayor porcentaje de amplitud del ultrasonido, existió mayor concentración de betalaínas. Esto puede deberse al aumento de la potencia ultrasónica distribuida al medio líquido, favoreciendo los efectos sonoquímicos y la cavitación, lo que incrementa el rendimiento de extracción de betalainas (Tabio-García et al., 2021).

### 8.2.2 Contenido fenólico total

Los valores del contenido fenólico total de la sopa crema de betabel termosonicada estuvieron entre 32.45 y 97.81 mg EAG/100 g bs; estos fueron menores a los de un jugo de fruta negra (black fruit) (Vivek, Mishra & Pradhan, 2018). Los resultados obtenidos no se ajustaron al modelo matemático, ya que se obtuvo una  $R^2$  de 0.60 (Tabla 8). El término cuadrático de amplitud ( $\beta_{11}$ ) exhibió una influencia significativa ( $p < 0.01$ ) (Tabla 9), mostrando que hay mayor presencia de compuestos fenólicos al disminuir la amplitud (Figura 7C). Este comportamiento fue diferente a un jugo de agracejo, ya que este mostró un incremento del contenido fenólico total respecto al aumento del tiempo aplicado, exponiendo una de  $p < 0.001$  (Hashemi et al., 2018).



Tabla 8. Efecto de tratamiento por termosonicación sobre los compuestos antioxidantes de la sopa crema de betabel

| Tratamiento (%Amplitud/min) | Betaninas (mg EB/100 g bs) | Betalainas Betaxantinas (mg EI/100 g bs) | Contenido fenólico total (mg EAG/100 g bs) |
|-----------------------------|----------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------------|
| 83%/12.5min                 | 55.50 ± 3.40               | 41.32 ± 1.00                             | 73.08 ± 0.04                               |
| 83%/9min                    | 65.69 ± 11.18              | 55.82 ± 1.36                             | 72.45 ± 0.48                               |
| 83%/12.5min                 | 53.33 ± 0.26               | 40.49 ± 3.16                             | 73.07 ± 1.19                               |
| 93%/12.5min                 | 62.29 ± 0.87               | 45.33 ± 0.72                             | 97.81 ± 0.16                               |
| 75%/15min                   | 80.50 ± 1.33               | 51.58 ± 0.96                             | 76.71 ± 5.56                               |
| 75%/10min                   | 65.52 ± 0.44               | 46.64 ± 0.33                             | 74.87 ± 2.85                               |
| 90%/10min                   | 77.68 ± 1.02               | 58.04 ± 0.62                             | 97.38 ± 0.48                               |
| 83%/12.5min                 | 37.69 ± 1.29               | 27.92 ± 0.40                             | 74.59 ± 0.83                               |
| 90%/15min                   | 25.93 ± 0.61               | 18.93 ± 0.36                             | 61.04 ± 0.92                               |
| 72%/12.5min                 | 108.26 ± 0.44              | 62.13 ± 0.33                             | 32.45 ± 0.66                               |
| 83%/12.5min                 | 38.19 ± 0.51               | 28.09 ± 0.43                             | 65.72 ± 0.27                               |
| 83%/12.5min                 | 45.50 ± 2.90               | 32.43 ± 2.21                             | 71.73 ± 0.61                               |
| 83%/16min                   | 45.73 ± 0.64               | 29.25 ± 0.36                             | 61.17 ± 0.62                               |
| <b>R<sup>2</sup></b>        | 0.91                       | 0.90                                     | 0.60                                       |

mg EB/100g bs (miligramos equivalentes de betaninas por 100g de bases seca) mg EI/100g bs (miligramos equivalentes de betaxantinas por 100 g de base seca) mg EAG/100 g bs (miligramos equivalentes de fenoles por 100 g de base seca)

Tabla 9. Coeficiente de regresión y ANOVA de los parámetros del modelo cuadrático de predicción de superficie de respuesta de las variables de betalainas y contenido fenólico total

| Coeficiente                      | Betaninas          | Betaxantinas       | Contenido Fenólico Total |
|----------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------------|
| $\beta_0$ (Intercepto)           | 46.04 <sup>a</sup> | 33.82 <sup>a</sup> | 65.072 <sup>b</sup>      |
| $\beta_1$ (amplitud)             | -4.60 <sup>c</sup> | -3.02 <sup>d</sup> | -3.09 <sup>c</sup>       |
| $\beta_2$ (tiempo)               | -2.78 <sup>d</sup> | -4.81 <sup>c</sup> | -0.66                    |
| $\beta_{12}$ (amplitud*tiempo)   | -4.04 <sup>c</sup> | -4.18 <sup>c</sup> | -1.04                    |
| $\beta_{11}$ (amplitud*amplitud) | 5.62 <sup>b</sup>  | 4.44 <sup>c</sup>  | 4.12 <sup>c</sup>        |
| $\beta_{22}$ (tiempo*tiempo)     | 0.90               | 1.64               | -0.95                    |

Niveles de significancia: <sup>a</sup>p<0.0001; <sup>b</sup>p<0.001; <sup>c</sup>p<0.01; <sup>d</sup>p<0.05

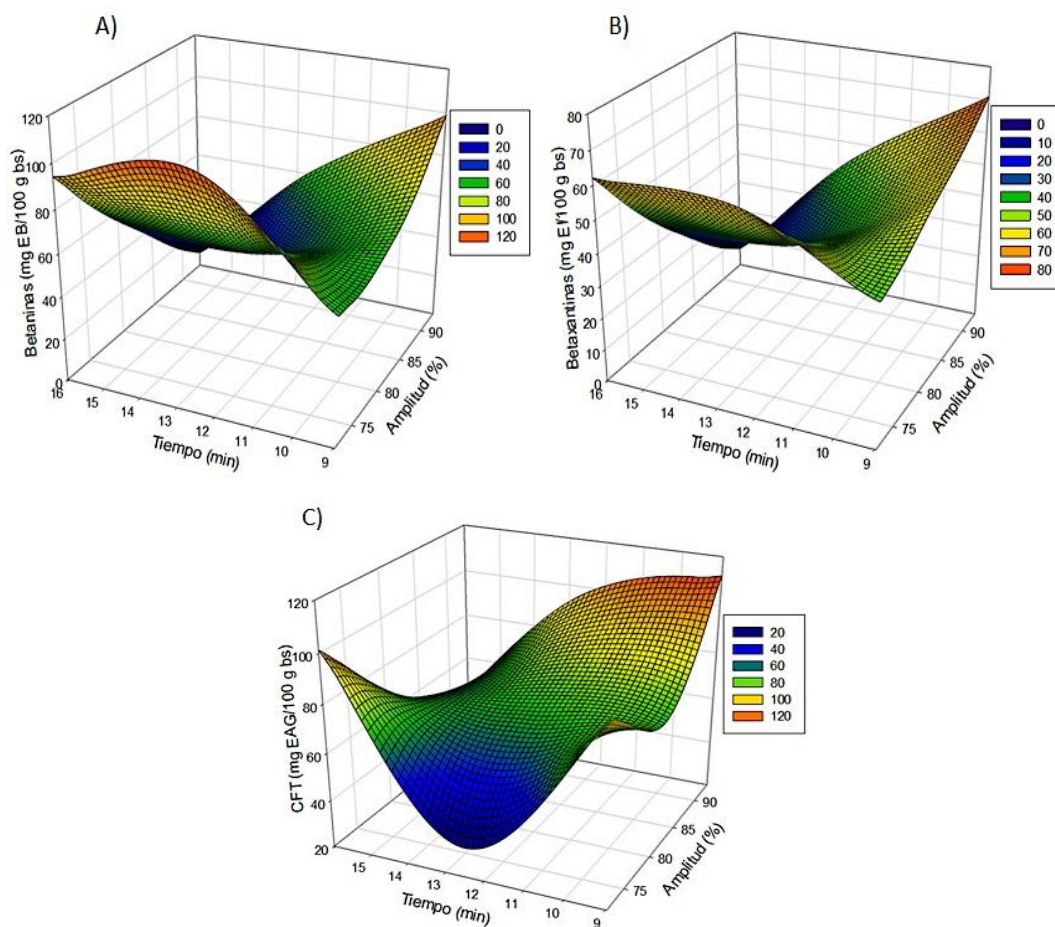


Figura 7. Efecto de termosonicación sobre betaninas (A), betaxantinas (B) y CFT: contenido fenólico total (C) de sopa crema de betabel

### 8.3 Capacidad antioxidante

La capacidad antioxidante de la sopa crema de betabel termosonicada fue medida por las metodologías de ABTS, DPPH y FRAP. En ABTS se obtuvieron valores de 0.23 a 2.80  $\mu\text{mol ET}/100 \text{ g bs}$  (Tabla 10). En una pulpa de palmito dulce se mostraron valores mayores (Madalão et al., 2021).

Los efectos de la actividad antioxidante, medida por la capacidad del atrapamiento del radical ABTS se ajustaron al modelo matemático con una  $R^2$  de 0.83. Se puede observar en la tabla 11 que esto fue principalmente afectado por el término cuadrático del tiempo ( $\beta_{22}$ ). El efecto se puede apreciar en la figura 8A, donde al incrementar el tiempo, se refleja una mayor capacidad antioxidante en ABTS. Este resultado fue distinto al de un jugo de betabel termosonicado, en

donde influyó de manera significativa el término lineal de amplitud ( $p < 0.001$ ) (Ramírez-Melo et al., 2022).

Respecto a la capacidad antioxidante por DPPH, se obtuvieron resultados que fueron de 2.47 a 22.23  $\mu\text{mol ET}/100 \text{ g bs}$  (Tabla 10). Este parámetro se ajustó al modelo matemático con una  $R^2$  de 0.87. El coeficiente de regresión indica que afectó significativamente ( $p < 0.001$ ) por la interacción de amplitud y tiempo ( $\beta_{12}$ ), así como el cuadrático de amplitud ( $\beta_{11}$ ) (Tabla 11). Se aprecia que al incrementar la amplitud y el tiempo, los valores en la capacidad antioxidante por DPPH aumentaron (Figura 8B). El comportamiento fue distinto a lo reportado por Ramírez-Melo et al. (2022), debido a que el término lineal de tiempo fue el más representativo con una  $p < 0.001$ .

Tabla 10. Efecto del tratamiento de termosonicación sobre la capacidad antioxidante de sopa crema de betabel

| Tratamiento<br>(%Amplitud/min) | ABTS•+ ( $\mu\text{mol}$<br>ET/100 g bs) | DPPH• ( $\mu\text{mol}$<br>ET/100 g bs) | FRAP ( $\mu\text{mol Fe}$<br>(II)/100 g bs) |
|--------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------------|
| 83%/12.5min                    | 1.06 $\pm$ 0.03                          | 6.77 $\pm$ 0.62                         | 10.58 $\pm$ 0.01                            |
| 83%/9min                       | 1.39 $\pm$ 0.03                          | 2.47 $\pm$ 0.12                         | 11.01 $\pm$ 0.85                            |
| 83%/12.5min                    | 0.91 $\pm$ 0.11                          | 9.62 $\pm$ 0.04                         | 12.85 $\pm$ 0.11                            |
| 93%/12.5min                    | 0.98 $\pm$ 0.25                          | 19.90 $\pm$ 2.16                        | 26.40 $\pm$ 0.12                            |
| 75%/15min                      | 1.24 $\pm$ 0.07                          | 5.97 $\pm$ 0.59                         | 28.20 $\pm$ 0.04                            |
| 75%/10min                      | 0.68 $\pm$ 0.23                          | 21.13 $\pm$ 0.16                        | 9.83 $\pm$ 0.38                             |
| 90%/10min                      | 0.50 $\pm$ 0.08                          | 5.21 $\pm$ 1.28                         | 13.06 $\pm$ 0.05                            |
| 83%/12.5min                    | 0.90 $\pm$ 0.03                          | 14.13 $\pm$ 0.82                        | 21.65 $\pm$ 0.40                            |
| 90%/15min                      | 1.18 $\pm$ 0.09                          | 18.32 $\pm$ 0.56                        | 26.76 $\pm$ 0.10                            |
| 72%/12.5min                    | 0.23 $\pm$ 0.12                          | 22.23 $\pm$ 0.29                        | 21.06 $\pm$ 0.20                            |
| 83%/12.5min                    | 0.71 $\pm$ 0.11                          | 10.70 $\pm$ 2.85                        | 22.50 $\pm$ 0.48                            |
| 83%/12.5min                    | 0.93 $\pm$ 0.23                          | 11.54 $\pm$ 0.10                        | 24.22 $\pm$ 0.37                            |
| 83%/16min                      | 2.80 $\pm$ 0.58                          | 12.10 $\pm$ 0.08                        | 27.28 $\pm$ 0.41                            |
| <b>R<sup>2</sup></b>           | 0.83                                     | 0.87                                    | 0.72                                        |

$\pm$ : desviación estándar.  $\mu\text{mol ET}/100 \text{ g bs}$  (micro moles equivalentes de Trolox por 100 g de base seca);  $\mu\text{mol Fe (II)}/100 \text{ g bs}$  (micro moles de hierro 2 por 100 g de base seca)

Finalmente en capacidad antioxidante por FRAP, los valores oscilaron de 9.83 a 28.20  $\mu\text{mol Fe (II)}/100 \text{ g bs}$ . Un rango menor (2.13 a 3.59  $\mu\text{mol}/100 \text{ mL}$ ) fue reportado en néctar de guanábana termosonicado (Zafra-Rojas et al., 2023). Este parámetro no se ajustó al modelo matemático ya que tuvo una  $R^2$  de 0.72 (Tabla 10). Los coeficientes de regresión del modelo muestran que el término lineal del tiempo ( $\beta_2$ ) fue el que obtuvo un efecto significativo ( $p < 0.001$ ) (Tabla 11), esto se puede interpretar en la figura 8C, ya que al aplicar mayor tiempo, se tienen mejores resultados en cuanto a la actividad antioxidante por FRAP.

De acuerdo a López-Martínez et al. (2022), en una bebida de mango y zanahoria se determinó FRAP y se obtuvo un nivel de significancia de  $p < 0.05$  correspondiente al término lineal de amplitud, resultados diferentes encontrados en el presente estudio.

Tabla 11. Coeficiente de regresión y ANOVA de los parámetros del modelo cuadrático de predicción de superficie de respuesta de variables de capacidad antioxidante

| Coeficiente                      | ABTS $\bullet^+$  | DPPH $\bullet$     | FRAP               |
|----------------------------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| $\beta_0$ (Intercepto)           | 0.90 <sup>a</sup> | 10.55 <sup>a</sup> | 18.36 <sup>a</sup> |
| $\beta_1$ (amplitud)             | 1.07              | -0.83              | 0.67               |
| $\beta_2$ (tiempo)               | 3.43 <sup>c</sup> | 1.36               | 4.05 <sup>b</sup>  |
| $\beta_{12}$ (amplitud*tiempo)   | 0.22              | 4.68 <sup>b</sup>  | -0.47              |
| $\beta_{11}$ (amplitud*amplitud) | -2.28             | 4.26 <sup>b</sup>  | 1.20               |
| $\beta_{22}$ (tiempo*tiempo)     | 3.94 <sup>c</sup> | -1.76              | -0.15              |

Niveles de significancia: <sup>a</sup> $p < 0.0001$ ; <sup>b</sup> $p < 0.001$ ; <sup>c</sup> $p < 0.01$ ; <sup>d</sup> $p < 0.05$

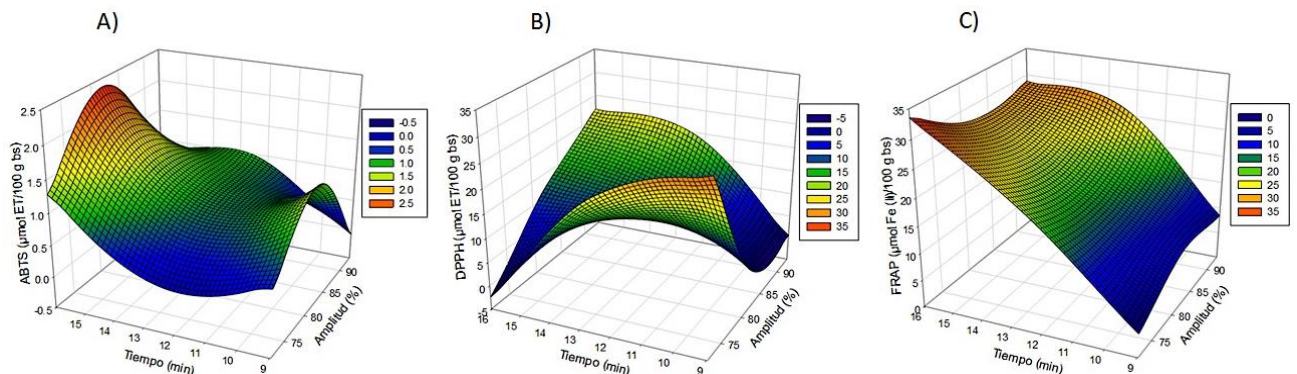


Figura 8. Efecto de termosonicación sobre la capacidad antioxidante de sopa crema de betabel, (A) ABTS, (B) DPPH y (C) FRAP

#### 8.4 Optimización de la sopa crema de betabel termosonicada

La condición óptima del proceso de termoultrasonido fue de 83% de amplitud con tiempo de 12.50 minutos. Los valores predichos obtenidos fueron los siguientes:

pH de 6.71,  $L^*$  de 36.17,  $a^*$  de 25.32,  $b^*$  de 1.76,  $h^\circ$  de 4.14,  $C^*$  de 25.09, viscosidad de 334 cP, CRA de 0.79 g/g, CRL de 0.67 g/g, CRG de 16.75 mg/g, CH de 17.65 mL/g, betaninas de 46.04 mg EB/100 g bs, betaxantinas de 33.82 mg EI/100 g bs, contenido fenólico total de 71.63 mg EAG/100 mL, ABTS de 0.90  $\mu\text{mol ET}/100$  g bs, DPPH de 10.55  $\mu\text{mol ET}/100$  g bs y FRAP de 18.36  $\mu\text{mol Fe (II)}/100$  g bs. Se realizó un traslape de figuras de contorno (Figura 9), para poder apreciar con más detalle la condición óptima de proceso de cada una de las variables de respuesta, donde se observa la zona de intersección de los indicadores con cada valor obtenido.

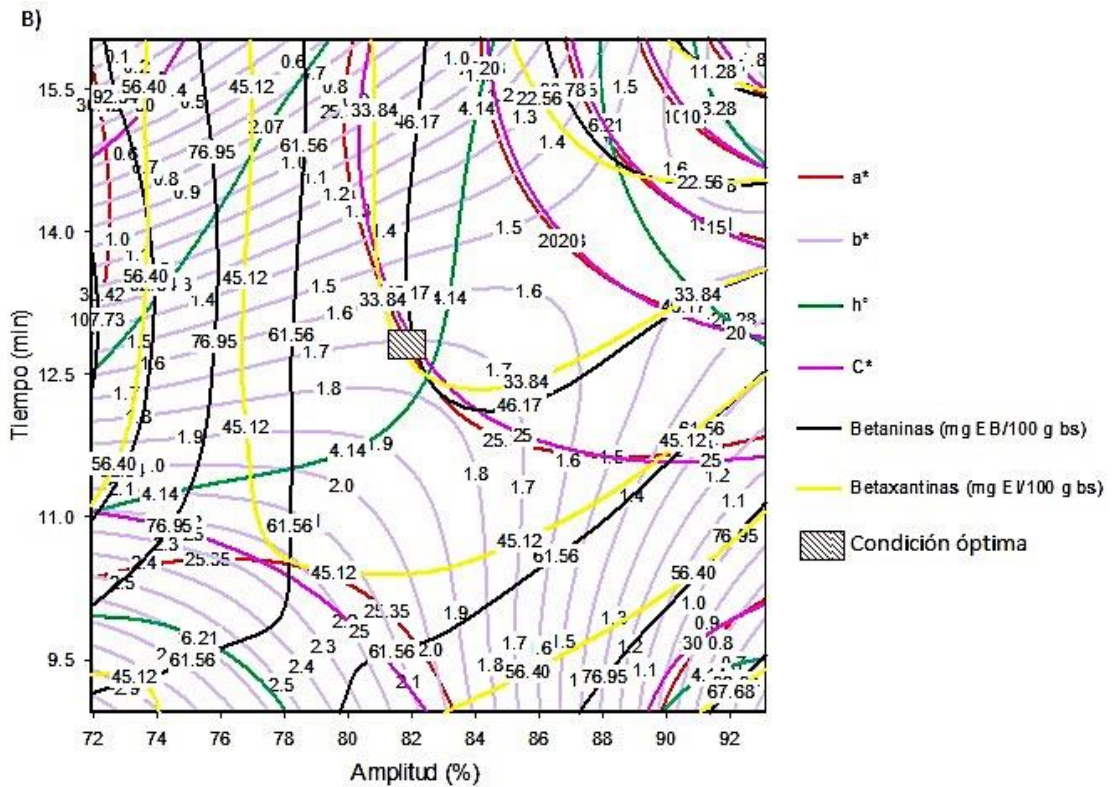
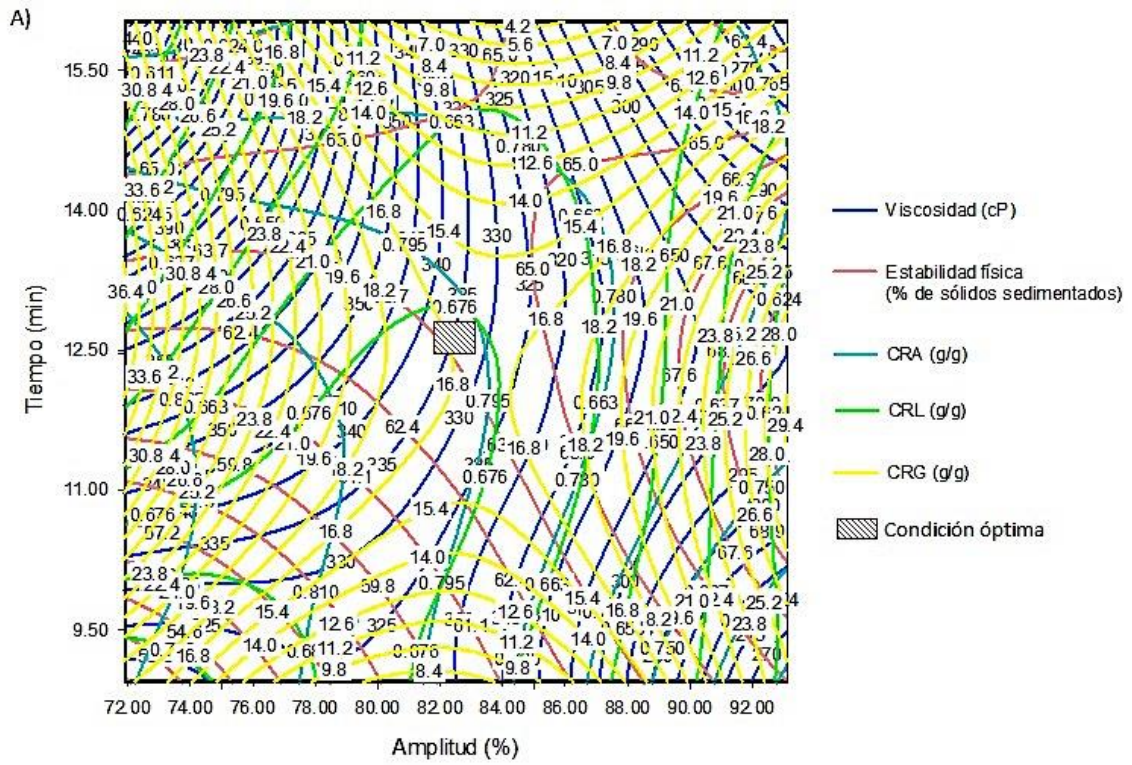


Figura 9. Traslape de figuras de contorno. A) Viscosidad, estabilidad física y propiedades funcionales. B) Parámetros de color y contenido de antioxidantes.

## 8.5 Reproducibilidad del estudio

Para establecer si la condición óptima del proceso obtenido es reproducible, se realizó una comparativa entre los valores predichos y los experimentales, los cuales se desarrollaron por triplicado, dando como resultado diferencias significativas en algunos parámetros. Por lo que existió reproducibilidad en pH, viscosidad, estabilidad física, en la coordenada de color de  $a^*$ , el parámetro  $C^*$ , capacidad de retención de agua, capacidad de retención de glucosa y contenido antioxidante de betalaínas (Tabla 12).

Tabla 12. Reproducibilidad del modelo de superficie de respuesta

| Determinaciones                                | Valor predicho | Valor experimental |
|------------------------------------------------|----------------|--------------------|
| pH                                             | 6.71 ± 0.03    | 6.84 ± 0.07        |
| Acidez titulable (% ácido cítrico)             | 0.2 ± 0.01     | 1.13 ± 0.003*      |
| Sólidos solubles totales (°Brix)               | 9.0 ± 0.02     | 9.0 ± 0.00*        |
| Viscosidad (cP)                                | 334 ± 11.63    | 260 ± 47.43        |
| Estabilidad física (% de sólidos sedimentados) | 63.77 ± 1.11   | 57.16 ± 5.18       |
| $L^*$                                          | 36.17 ± 0.89   | 33.78 ± 0.52*      |
| $a^*$                                          | 25.32 ± 1.82   | 25.31 ± 2.36       |
| $b^*$                                          | 1.76 ± 0.22    | 0.47 ± 0.18*       |
| $h^\circ$                                      | 4.14 ± 0.60    | 1.37 ± 0.59*       |
| $C^*$                                          | 25.09 ± 1.69   | 25.32 ± 2.36       |
| Capacidad de retención de agua (g/g)           | 0.79 ± 0.01    | 0.80 ± 0.03        |
| Capacidad de retención de lípidos (g/g)        | 0.67 ± 0.00    | 0.74 ± 0.02*       |
| Capacidad de hinchamiento (mL/g)               | 17.65 ± 2.85   | 9.15 ± 1.84*       |
| Capacidad de retención de glucosa (g/g)        | 16.73 ± 1.07   | 13.85 ± 1.76       |
| Contenido fenólico total (mg EAG/100 g bs)     | 65.07 ± 28.80  | 122.27 ± 9.22*     |
| Betaninas (mg EB/100 g bs)                     | 46.04 ± 8.73   | 65.66 ± 3.10       |
| Betaxantinas (mg EI/100 g bs)                  | 33.82 ± 5.57   | 40.54 ± 1.60       |
| ABTS (μmol ET/100 g bs)                        | 0.90 ± 0.28    | 14.50 ± 1.00*      |
| DPPH (μmol ET/100 g bs)                        | 10.55 ± 3.20   | 469.65 ± 34.37*    |
| FRAP (μmol Fe (II)/100 g bs)                   | 18.36 ± 5.22   | 40.61 ± 4.35*      |

\*Indica diferencia significativa  $p < 0.05$

## 8.6 Comparación de sopa crema de betabel optimizada con una sopa crema pasteurizada

Para la comparación de las sopas crema, se desarrollaron las determinaciones que se ajustaron al modelo matemático, los cuales fueron: pH, viscosidad, estabilidad física, color (la coordenada  $a^*$  y el parámetro  $C^*$ ), capacidad de retención de agua, capacidad de retención de glucosa y capacidad antioxidante en DPPH. Además, a pesar de que no se obtuvo reproducibilidad en algunos parámetros, estos se realizaron ya que están directamente relacionados. Por ejemplo, la viscosidad con las propiedades funcionales, compuestos antioxidantes y su bioaccesibilidad *in vitro*.

## 8.7 Propiedades fisicoquímicas

### 8.7.1 pH

El potencial de hidrógeno es una medida convencional que permite expresar la concentración de iones hidrógeno de manera simplificada (Meza-García, 2011). En la figura 10, se observa que la muestra termosonicada y pasteurizada presentaron los valores de pH más altos ( $p < 0.05$ ) en comparación con la control. Esto se relaciona con la estabilidad en diversos pigmentos como las betalaínas (Calva-Quintana, 2021). Cejudo-Bastante et al., (2016), menciona que las betalaínas son estables rango de pH 3 a 7, sin embargo la estabilidad óptima se alcanza a pH de 5 y 6.

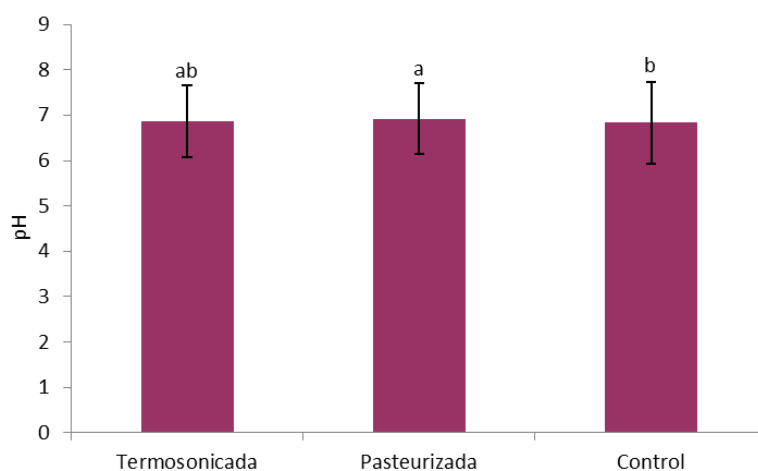


Figura 10. pH de sopas cremas de betabel. <sup>a-b</sup>Letras diferentes indican diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre las muestras.



### 8.7.2 Color

El color es una cualidad influyente de los alimentos frescos y procesados que determina la primera impresión e impacta en la elección de los consumidores (Kidoñ & Uwineza, 2022). En la tabla 13 se puede apreciar que la sopa crema termosonicada y pasteurizada mostraron valores semejantes en el parámetro de  $L^*$  ( $p>0.05$ ), siendo menores significativamente a la muestra control. Similar comportamiento se obtuvo en la coordenada  $a^*$ , en la muestra termosonicada y pasteurizada, sin embargo la sopa crema termosonicada fue mayor respecto al control. En  $b^*$  y  $h^\circ$ , todas las sopas cremas se comportaron igual, siendo la termosonicada la que obtuvo menores valores significativamente en relación a las otras. Mientras que en  $C^*$ , ninguna muestra presentó diferencia significativa ( $p>0.05$ ). Un comportamiento semejante se reportó en un jugo de arrayán chino termosonicado (Li et al., 2019), en el cual los valores de  $b^*$  también disminuyeron en comparación con la muestra pasteurizada. En un jugo de jobo termosonicado los resultados fueron distintos, debido a que los valores de  $L^*$  y  $b^*$  mostraron un aumento en la muestra termosonicada (Oladunjoye, 2021).

El alto valor en los parámetros de color de la muestra control ( $L^*$ ,  $b^*$  y  $h^\circ$ ) podría deberse al efecto del tratamiento térmico, en donde se alcanzó ebullición y por ello se presentó degradación de betalaínas, ya que tiende a ser más rápida si la temperatura es superior a 60 °C y si el periodo de calentamiento es más largo (Coy-Barrera, 2020). En el caso de los resultados expuestos en la sopa crema termosonicada, donde se presentó un aumento del color en la coordenada  $a^*$  (indicativo del color rojo), puede ser la respuesta de la formación en reacciones de pardeamiento durante el tratamiento con ultrasonido (Wang et al., 2019). Maran (2015) menciona que el contenido del pigmento extraído se debe a la hinchazón y agrandamiento de poros, causados por la cavitación, lo que a su vez actúa en la penetración del disolvente en la muestra. En este caso, influye el contenido de agua presente en la sopa crema, puesto que las betaninas son solubles en agua (Esquivel, 2024). Por otro lado, la disminución de  $L^*$  y  $b^*$ , se relacionan con una reacción de Maillard por la temperatura y el tiempo de exposición de sonicación (Adekunte et al., 2010). Además influye la cavitación, debido a que puede inducir cambios en el color mediante aceleración de

reacciones químicas, aumento de la velocidad de difusión y descomposición de las partículas (Tomadoni et al., 2017). Un comportamiento similar se mostró en un jugo de sandía y remolacha (Mukhtar et al., 2024), ya que los hallazgos tuvieron un impacto en la coordenada  $a^*$  en la prueba termosonicada, en contraste con las otras muestras.

Tabla 13. Coordenadas de color de sopas cremas de betabel

| Muestra       | $L^*$              | $a^*$                 | $b^*$             | $h^\circ$          | $C^*$              |
|---------------|--------------------|-----------------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| Termosonicada | $33.78 \pm 0.52^b$ | $25.31 \pm 2.36^a$    | $0.47 \pm 0.18^c$ | $1.37 \pm 0.59^c$  | $25.32 \pm 2.36^a$ |
| Pasteurizada  | $34.15 \pm 0.48^b$ | $24.43 \pm 2.23^{ab}$ | $2.21 \pm 0.86^b$ | $5.86 \pm 2.00^b$  | $25.33 \pm 2.53^a$ |
| Control       | $36.46 \pm 0.32^a$ | $23.02 \pm 1.20^b$    | $4.47 \pm 0.32^a$ | $11.36 \pm 0.80^a$ | $23.79 \pm 1.71^a$ |

<sup>a-c</sup>Letras superíndices diferentes indican diferencia significativa ( $p < 0.05$ ) entre las muestras

### 8.7.3 Estabilidad física

La estabilidad física de un producto, es una de las características a considerar por el consumidor para que sea mayormente aceptado (Salehi, 2020). En la figura 11 se observan los resultados obtenidos de estabilidad física (% de sólidos sedimentados) de las diferentes muestras. La sopa crema termosonicada y control no mostraron diferencias significativas ( $p > 0.05$ ), exhibiendo mayor estabilidad física (menor % de sólidos sedimentados) ( $57.16 \pm 5.18$  y  $63.14 \pm 7.73$ , respectivamente) en comparación con la pasteurizada ( $88.28 \pm 5.26\%$ ). Se presentaron datos similares en leche sometida a tratamiento de termosonicación, obteniendo resultados positivos para el porcentaje de estabilidad física (Hernández-Falcón et al., 2018). Las partículas presentes en la sopa crema podrían volverse más pequeñas, debido a la reducción del tamaño provocado por el ultrasonido, permitiendo que éstas permanezcan en el sobrenadante (Zafra-Rojas et al., 2013). Por otra parte, los hallazgos encontrados en la muestra control podría deberse a la adición de oca en las sopas crema, puesto que la ebullición mejora la estabilidad mediante la gelatinización del almidón (Feng et al., 2020). Además, se ha visto que los tratamientos térmicos reducen el diámetro de glóbulos grasos y proteínas (caseínas) en la leche (Villamiel y De Jong 2000; Hazra et al., 2021).

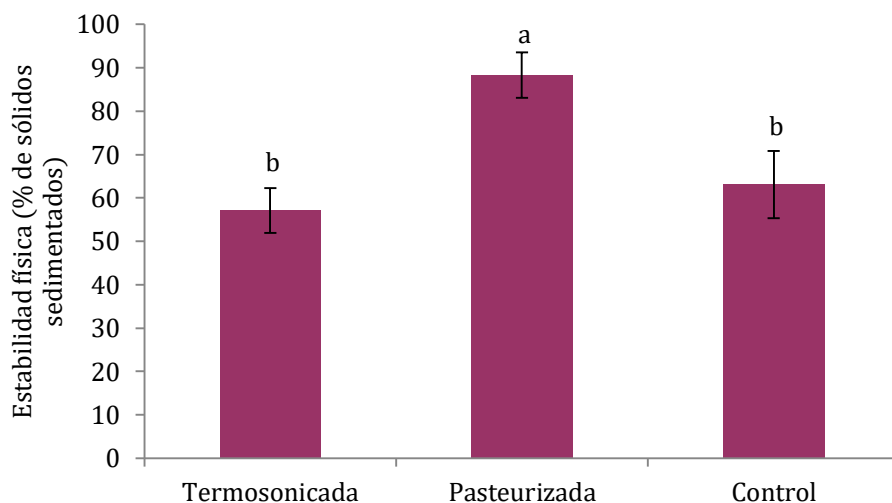


Figura 11. Porcentaje de estabilidad física en las sopas crema de betabel. <sup>a-b</sup>Letras diferentes indican diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre las muestras

## 8.8 Viscosidad y propiedades funcionales

### 8.8.1 Viscosidad

La viscosidad es una propiedad reológica esencial para predecir el comportamiento de cualquier fluido (Bhattad, 2023). En la figura 12 se presentan los resultados obtenidos en este parámetro en la sopa crema de betabel termosonicada, pasteurizada y control. La sopa crema termosonicada fue mayor significativamente ( $180 \pm 82.15$  cP) en comparación con la pasteurizada y control ( $166.66 \pm 30$  y  $110 \pm 15$  cP, respectivamente). El aumento de la viscosidad en la muestra termosonicada puede ser atribuido a la influencia del tratamiento aplicado, generando una afectación en la fibra del betabel y componentes de la leche, mediante las ondas sonoras, produciendo una reducción en el tamaño de las partículas (Soria & Villamiel, 2010; Ojha et al., 2018). Lo obtenido en la sopa crema pasteurizada y control, posiblemente tiene una relación con la presencia de las micelas de caseína de la leche, en donde la temperatura aplicada provocó su desnaturalización; además del tamaño del glóbulo de grasa, la cual influye en la resistencia al flujo. Diferentes resultados fueron reportados por Anaya-Esparza et al. (2018), en néctar de guanábana termosonicado, debido a que presentó menor viscosidad, en comparación con el pasteurizado y control. De igual manera Adiamo et al. (2018) expuso datos inferiores en jugo de zanahoria con pulpa de naranja termosonicado que en los demás tratamientos.

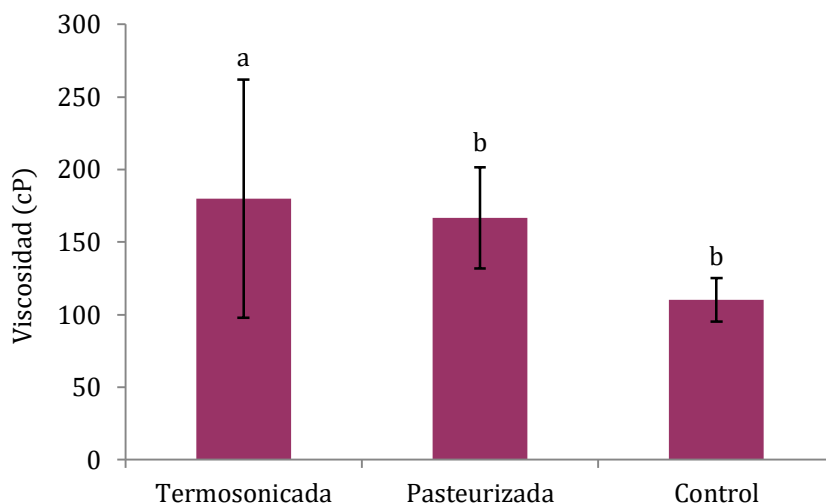


Figura 12. Viscosidad de sopas cremas de betabel. <sup>a-b</sup>Letras diferentes indican diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre las muestras

### 8.8.2 Capacidad de retención de agua e hinchamiento

La capacidad de retención de agua (CRA) es la cantidad de líquido que una proteína o un hidrato de carbono puede retener (Badui, 2019). Por otra parte, la capacidad de hinchamiento (CH) es definida como el volumen de agua que ocupa una muestra hidratada (Luo et al., 2017). Los resultados de estas propiedades funcionales se pueden apreciar en la Figura 13. En CRA la sopa crema termosonicada y control fueron mayores significativamente ( $p < 0.05$ ) en comparación con la pasteurizada, exponiendo valores de  $0.80 \pm 0.03$ ,  $0.81 \pm 0.03$  y  $0.64 \pm 0.15$  g/g, respectivamente (Figura 13A). Mientras que en CH la muestra termosonicada, control y pasteurizada obtuvieron diferencia significativa ( $p < 0.05$ ), obteniendo datos de  $9.15 \pm 1.84$ ,  $4.49 \pm 0.74$  y  $2.77 \pm 2.03$  g/g, respectivamente (Figura 13B).

En CRA, un comportamiento similar se dio a conocer en un jugo de aloe vera termosonicado (Alvarado-Morales et al., 2019), dado que se demostró un aumento significativo ( $p < 0.05$ ) tanto en las muestras termosonicadas, como en las que se sometieron a calentamiento. La CRA se relaciona con la composición de la fibra, teniendo en cuenta que a mayor cantidad de fibra soluble, esta propiedad aumenta (Carvajal-Macías et al., 2019). El valor obtenido de la CRA en la muestra termosonicada, se debe al aumento de la fibra soluble a causa de burbujas de tamaño micrométrico que crecen y colapsan en el proceso de ultrasonido, lo que

produce ondas de choque y espacios reducidos de gradientes de alta presión, capaces de modificar la estructura de las moléculas presentes en la fibra (Xu et al., 2014; Tejada-Ortigoza et al., 2016). Los efectos demostrados en la sopa control podrían deberse al cambio de la composición de la pared celular, inducida por la temperatura elevada, ya que ésta rompe enlaces glicosídicos del polisacárido, lo que puede provocar liberación de oligosacáridos y, en consecuencia, aumentar la cantidad de fibra soluble (Bader et al., 2019a; Bader et al., 2019b; Wang et al., 2015). Andersson et al. (2022), relaciona la CRA con el incremento de la fibra soluble en el betabel, sin embargo menciona que esto depende del tipo de matriz, de la composición del alimento, los distintos procesos o métodos de cocción, por la presencia de polímeros entrecruzados en las paredes celulares del betabel, que están relacionados con una fuerte adhesión célula-célula.

La CRA tiene beneficios en la salud, ya que es útil para la prevención del estreñimiento y puede contribuir con la distensión gástrica, lo que desencadena señales aferentes aumentando la saciedad y con ello contribuyendo con el control del apetito (Slavin, 2013). Asimismo, la CRA involucra la fibra soluble en donde los microorganismos que degradan la fibra en el intestino, pueden acceder y metabolizarla con facilidad produciendo una sucesión de metabolitos funcionales como el péptido 1 y la 7 $\alpha$ -deshidroxilasa (Guan, Yu & Feng, 2021). Además, participa directamente en la fermentación colónica y tiene un efecto protector del epitelio intestinal. De igual manera, se produce un proceso de fermentación, que resulta de su CRA, el cual puede ayudar a normalizar la concentración de triglicéridos en sangre, a través de los subproductos que este causa (McRorie & McKeown, 2017). Por otro lado, la importancia de la CRA en el ámbito tecnológico es porque tiene la función de ser agente texturizante, debido a que produce la formación de un gel que engloba moléculas de agua. Adicionalmente, permiten reemplazar o cumplir ciertas funciones similares al de las grasas, por lo que se pueden elaborar productos lácteos como el yogur, quesos o helados (Villanueva-Flores, 2019).

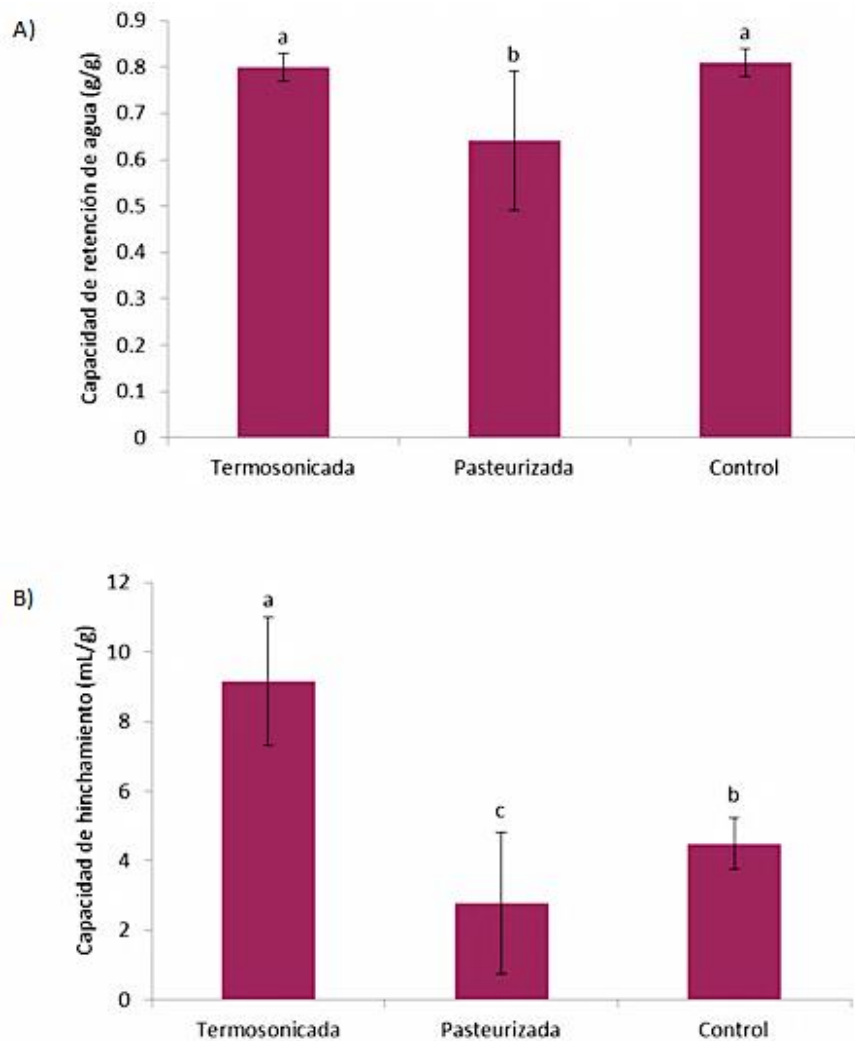


Figura 13. Capacidad de retención de agua (A) y capacidad de hinchamiento (B) de sopas cremas de betabel. <sup>a-b</sup>Letras diferentes indican diferencias significativa ( $p < 0.05$ ) entre las muestras.

Respecto a los resultados de la capacidad de hinchamiento, un comportamiento similar se observó en un jugo de aloe vera termosonicado Alvarado-Morales et al. (2019), en el que el tratado mediante termoultrasonido tuvo efectos mayores en comparación con el pasteurizado. El efecto alcanzado en el tratamiento termosonicado puede ser a causa de la destrucción de la pared celular de la matriz, causando mayor penetración en los poros y con ello, la hidratación e hinchazón (Manzoor, 2021). La CH está estrechamente relacionada con la temperatura, estructura química, tamaño de partícula, disponibilidad de agua, especie de carbohidratos y proteínas; además de la porosidad de la muestra (He et al., 2020; Igbokwe, 2024). Por esto, lo expuesto en la sopa crema control podría estar relacionado con la leche, ya que la liberación de una sustancia

transportada por la caseína y las proteínas del suero están influenciadas por el pH del entorno circundante, que afecta el comportamiento de hinchamiento de las proteínas. Sin embargo, a medida que el pH incrementa a un nivel neutro, el comportamiento de hinchamiento también (Bali & Khan, 2023; Song & Kim, 2019).

Dentro del aspecto tecnológico, la capacidad de hinchamiento tiene la cualidad de actuar como agente espesante, estabilizador y emulsificante en alimentos (Majzoobi & Farahnaky, 2021).

### **8.8.3 Capacidad de retención de lípidos**

La capacidad de retención de lípidos (CRL) es la cantidad de aceite retenido por la fibra y se determina mediante densidad de carga general y la naturaleza hidrófoba de los componentes presentes en esta (Karaman, Yilmaz & Tuncel, 2017). En la figura 14 se contemplan los resultados de la CRL, donde las muestras sometidas a termosonicación, pasteurización y control no presentaron diferencias significativas ( $p > 0.05$ ), obteniendo valores de  $0.74 \pm 0.02$ ,  $0.72 \pm 0.01$  y  $0.72 \pm 0.03$  g/g, respectivamente. Alvarado-Morales et al. (2019), reportó un comportamiento distinto en un jugo de aloe vera termosonicado, en el que alcanzó mayor CRL en comparación con el pasteurizado. Como se mencionó anteriormente en CRA, durante los procesos de cocción y la aplicación a diferentes temperaturas, se generan cambios estructurales en la fibra, rompiendo los polímeros de los polisacáridos y generando mayor fibra soluble (Hotchkiss et al., 2022; Bader et al., 2019). Esto coincide con Dhingra et al., (2012), quien menciona que por lo general el calentamiento de los alimentos modifica la proporción de fibra insoluble a soluble, y refleja los resultados obtenidos en las sopas cremas, puesto que no hubo diferencia entre ellas. Por otro lado, la termosonicación provoca fuerzas de corte hidrodinámicas asociadas con la cavitación, lo que promueve la interrupción de interacciones hidrofóbicas y electrostáticas entre polímeros, mejorando su solubilidad (Zhu et al., 2015; O'Sullivan et al., 2016). También sucede una liberación de pectina que está unida a la celulosa de los fragmentos de la pared celular del betabel, lo que genera una gelificación y podría estar relacionada con una mayor susceptibilidad en la estructura de la fibra ante las fuerzas de corte provocadas por la cavitación,

dando como resultado una transición de la fibra insoluble a soluble (Kalla-Bertholdt et al., 2023).

La fibra soluble e insoluble son importantes en la salud. Por un lado la soluble se relaciona con la CRA y CH en donde existe una absorción de agua, de manera que aumenta la saciedad y puede retrasar la absorción de nutrientes, reduciendo la ingesta de energía y contribuyendo a la prevención de la obesidad (Lambert et al., 2017). También puede ayudar en pacientes con reflujo gastroesofágico puesto que disminuye su frecuencia y acidez en el estómago (Morozov, Isakov & Konovalova 2018). Por otro lado, la fibra insoluble, relacionada con la CRL generalmente aumenta la masa fecal, excreción de ácidos biliares, a la vez que disminuye el tiempo de tránsito gastrointestinal (Mudgil, 2017; Dahl et al., 2015). Además en el campo tecnológico es utilizada como emulsificante y estabilizador de emulsiones como sopas y salsas, por la capacidad de retener aceite (He et al., 2020; Villanueva-Flores, 2019).

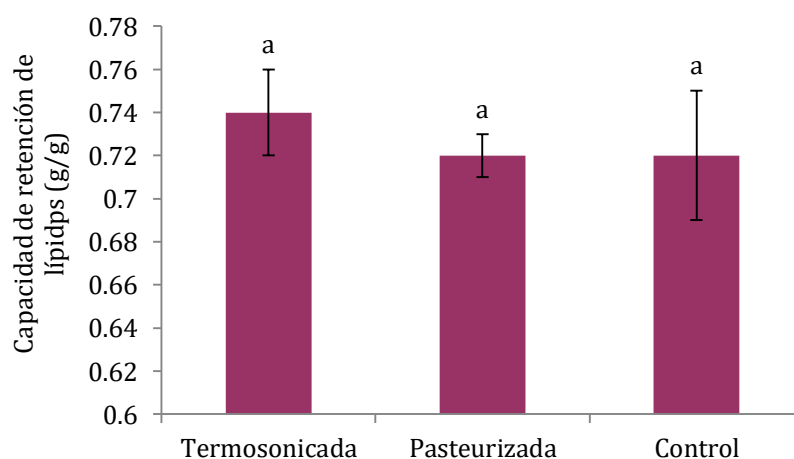


Figura 14. Capacidad de retención de lípidos de sopas cremas de betabel. <sup>a-b</sup>Letras diferentes indican diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre las muestras

#### 8.8.4 Capacidad de retención de glucosa

La capacidad de retención de glucosa (CRG) es una propiedad funcional de los alimentos que está estrechamente relacionada con la fibra dietética (Qi et al., 2016). Los resultados pueden apreciarse en la figura 15. Las muestras sometidas a los diferentes tratamientos presentaron diferencia significativa ( $p < 0.05$ ), siendo la muestra control quien tuvo los valores más altos ( $53.41 \pm 16.02$  g/g). Posteriormente la sopa crema termosonicada ( $13.85 \pm 1.76$  g/g) y en la



pasteurizada no se detectó esta capacidad de retención de glucosa. Hasta el momento no se han reportado estudios de sopa crema en base a esta propiedad. Sin embargo, en fibra soluble de paja de ajo ultrasonificada se alcanzaron efectos similares, debido a que el tratamiento de ultrasonido disminuyó la CRG (Huang et al., 2019).

La CRG tiene mayor relación con la fibra soluble, que está constituida por  $\beta$ -glucanos, oligosacáridos, mucílagos, pectinas y gomas que forman geles (Saldaña-Cejudo et al., 2020). Se ha visto que en tratamientos con tiempos prolongados de termosonicación, se puede cambiar la estructura de los polisacáridos o puede ocurrir una degradación (Moorthy et al., 2015), lo cual influiría en la baja capacidad para retener componentes como la glucosa. Lo anterior, podría estar relacionado con los resultados obtenidos, ya que la sopa crema se sometió a tratamiento por 12 minutos y la sopa control únicamente a cocción de 3 minutos. Por otro lado, la muestra control alcanzó temperaturas por arriba de 60 °C (ebullición) y esto quizás beneficie el contenido de fibra soluble, ya que al hincharse provoca un aumento de la viscosidad y a su vez, mayor retención de glucosa (Martínez-Las Heras et al., 2017; Lattimer & Haub, 2010). La CRG se relaciona a nivel fisiológico con la reducción de glucosa en sangre, mediante la formación de una estructura en forma de red por parte de la fibra, que atrapa moléculas de glucosa, por lo que esta propiedad tendría la capacidad de ayudar a controlar algunas enfermedades como la diabetes (He et al., 2022).

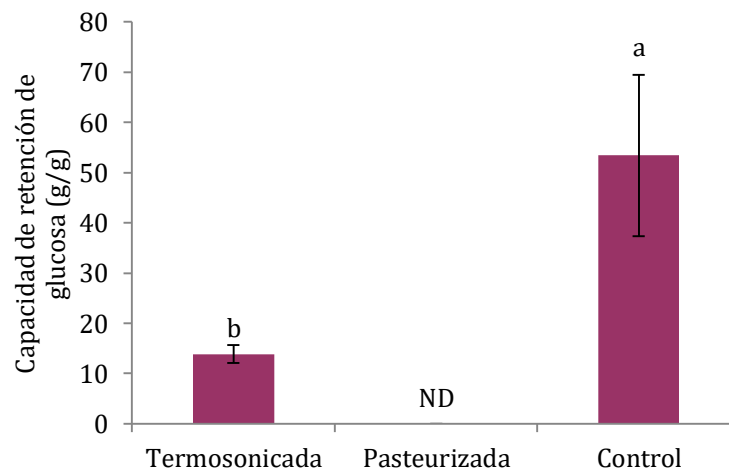


Figura 15. Capacidad de retención de glucosa de sopa crema de betabel l con diferente tratamiento. <sup>a-b</sup>Letras diferentes indican diferencia significativa ( $p < 0.05$ ) entre las muestras. ND: No detectado

## 8.9 Bioaccesibilidad *in vitro* de compuestos bioactivos y capacidad antioxidante

### 8.9.1 Betalaínas

Las betalaínas son pigmentos vegetales solubles en agua en los que se encuentran las betaninas (pigmentos rojos) y las betaxaninas (pigmentos amarillos), las que se identifican en función de su estructura y composición química (Chhikara et al., 2018). El contenido de betaninas y betaxantinas de la muestra original (antes de la determinación de bioaccesibilidad *in vitro*) se muestran en la figura 16. La sopa termosonicada mostró valores altos significativamente ( $p < 0.05$ ) en betaninas y betaxantinas ( $65.65 \pm 3.1$  mg EB/100 g bs y  $40.53 \pm 1.59$  mg EI/100 g bs, respectivamente) en comparación con la sopa crema pasteurizada ( $31.63 \pm 5.29$  EB/100 g bs y  $28.13 \pm 0.90$  mg EI/100 g bs, respectivamente) y la muestra control ( $47.28 \pm 4.99$  EB/100 g bs y  $32.35 \pm 1.36$  EI/100 g bs, respectivamente) (Figura 16A y 16B). Un comportamiento similar para betaninas se obtuvo en un jugo de betabel termosonicado, mientras que para betaxantinas el comportamiento fue distinto, ya que se alcanzaron datos menores, en comparación con un tratamiento térmico (Ramírez-Melo et al., 2022). Los resultados obtenidos podrían estar relacionados con la reacción de catabolización y cavitación de ondas del termoultrasonido y posterior, la liberación de moléculas de betalaínas contenidas en las vacuolas del betabel (Bassey, Cheng y Sun, 2022). También se le puede atribuir a la presencia de betalainas y a su solubilidad, por tanto aumenta el rendimiento de estos compuestos en la sopa crema (Strieder et al., 2019). Dentro de los beneficios que tienen las betalainas en la salud, se encuentra la prevención de la oxidación del colesterol LDL y cáncer; puede ajustar el sistema redox, creando un buen ambiente celular, poseen actividad antiinflamatoria y antioxidante (Esatbeyoglu et al., 2014; Farabegoli et al., 2017; Chauhan et al., 2013; Preczenhak et al., 2019). Por otro lado, las betalainas son utilizadas en la industria alimentaria como colorantes para alimentos y bebidas, debido a la aceptabilidad y seguridad que brinda a los consumidores (Nabi et al., 2023).

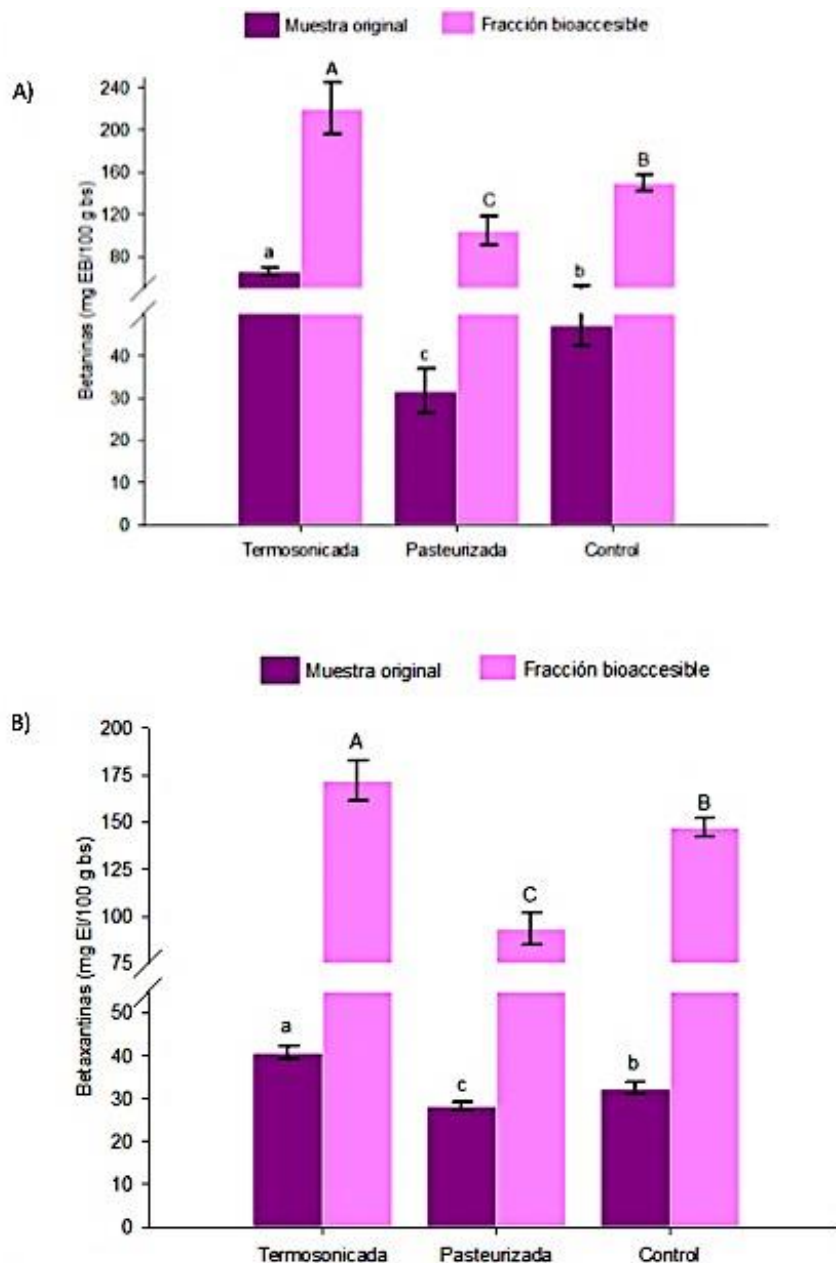


Figura 16. Contenido de betaninas (A) y betaxantinas (B) en muestra original y fracción bioaccesible de sopas cremas de betabel. <sup>a-c</sup>Letras diferentes indican diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre las muestras originales. <sup>A-C</sup>Letras diferentes indican diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre la fracción bioaccesible.

Después de realizar la bioaccesibilidad intestinal *in vitro* de antioxidantes en las sopas cremas, se observó un aumento de la bioaccesibilidad en todas las muestras. Sin embargo, las sopas crema termosonicadas mostraron valores más altos en betaninas y betaxantinas ( $220.36 \pm 23.78$  mg EB/100 g bs y  $172.02 \pm 10.93$  mg EI/100 g bs, respectivamente). Cabe mencionar que estas muestras tuvieron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) en comparación con los otros

tratamientos (Figura 16A y 16B). La absorción de estos compuestos fue de 3.5 y 4.2 veces más, en relación con la muestra original.

La muestra control ( $149.81 \pm 7.63$  mg EB/100 g bs y  $147.38 \pm 4.82$  mg EI/100 g bs) fue mayor significativamente que la sopa crema pasteurizada ( $104.78 \pm 13.54$  mg EB/100 g bs y  $93.23 \pm 8.41$  mg EI/100 g bs), generando una bioaccesibilidad de 3.1 y 4.5 veces más para la muestra control y de 3.3 y 3.3 veces más respectivamente, para la sopa crema pasteurizada. Un comportamiento distinto se reportó en un jugo de betabel termosonicado, ya que los resultados en éste fueron menores después de la bioaccesibilidad *in vitro* (Ramírez-Melo et al., 2022). La bioaccesibilidad de las betalainas depende de su estabilidad química en el tracto digestivo y la composición de la matriz en la que se encuentran. Además, las betalainas son más estables entre pH de 3 y 7, por lo que las condiciones gástricas podrían intervenir en la bioaccesibilidad. Asimismo, se ha demostrado que la fibra tiene un gran potencial para proteger las betacianinas en la digestibilidad y la influencia del ultrasonido también podría influir en la bioaccesibilidad, debido a la destrucción de la pared y la matriz celular que provoca una liberación de compuestos antioxidantes (Mai et al., 2023; Nirmal et al., 2021; Zhang et al., 2021).

### **8.9.2 Contenido fenólico total**

Los fenoles son metabolitos secundarios presentes en las plantas, se pueden encontrar de forma libre o ligada y son responsables de la actividad antioxidante (Ahmed & Ali, 2013; Gan et al., 2019). Los datos alcanzados en la muestra original se aprecian en la figura 17. La sopa crema termosonicada fue significativamente mayor ( $122.27 \pm 9.22$  mg EAG/100 g bs), en comparación con la muestra pasteurizada y control ( $107.59 \pm 15.12$  y  $106.94 \pm 2.97$  mg EAG/100 g bs, respectivamente). Hasta el momento, no existen estudios llevados a cabo en sopa crema termosonicada. Sin embargo, se encontró un estudio realizado en sopa crema de ginseng sonicada, en la cual reportaron valores menores (65.1 mg EAG/100 g bs) a lo obtenido en el presente estudio. Los hallazgos mencionados pueden explicarse por el contenido de fenoles presentes en el betabel y el fenómeno de cavitación acústica que genera el ultrasonido, ya que las ondas rompen las paredes celulares, facilitando la inserción en los materiales vegetales

(Fu et al., 2020; Fernando et al., 2021). Además, la relación entre las proteínas de la leche y los polifenoles pueden producirse por las fuerzas de Van der Waals, enlaces de hidrógeno e interacciones hidrofóbicas, donde la sonicación podría romperlas y generar liberación de fenoles (Hassan et al., 2013). Estos compuestos pueden ser utilizados en la industria alimentaria como antioxidantes, ya que reducen reacciones de oxidación con diferentes compuestos que afectan la calidad sensorial y nutricional de los productos (Sánchez-Bravo et al., 2022; Trapani et al., 2017). Adicionalmente, tienen efectos importantes en la salud, debido a que reducen la incidencia de enfermedades como diabetes, cáncer, accidentes cerebrovasculares, presión arterial, la vasodilatación al mismo tiempo que actúa como antioxidante y antiinflamatorio (Ozcan, 2014; Di Lorenzo, 2021).

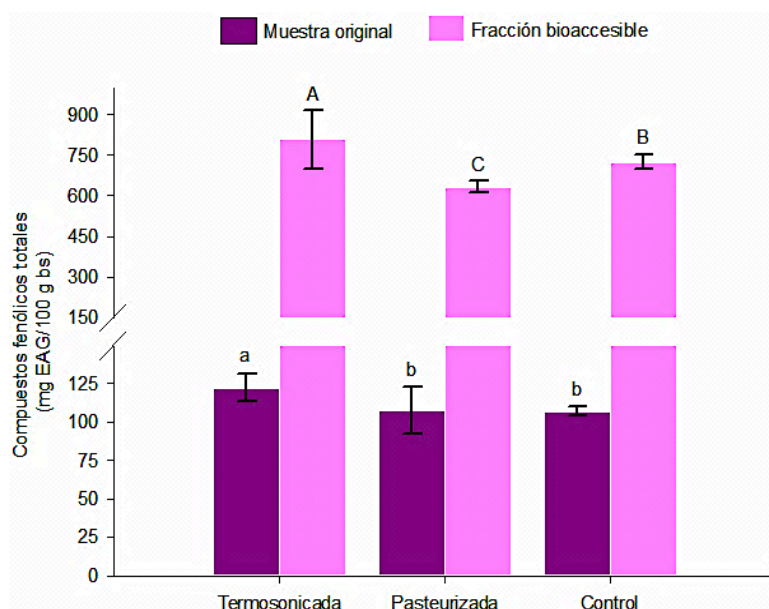


Figura 17. Contenido fenólico total en muestra original y fracción bioaccesible de sopas cremas de betabel. <sup>a-b</sup>Letras diferentes indican diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) en muestras originales. <sup>A-C</sup>Letras diferentes indican diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) en la fracción bioaccesible

Respecto a la fracción bioaccesible del contenido fenólico total (Figura 17), se aprecia que la sopa crema termosonicada fue mayor significativamente ( $p < 0.05$ ) con  $807.96 \pm 109.2$  mg EAG/100 g bs, mientras que la muestra control y pasteurizada arrojaron valores más bajos ( $722.62 \pm 26.48$  y  $632.80 \pm 20.80$  mg EAG/100 g bs, respectivamente). La sopa crema termosonicada y control presentaron 6.6 y 6.7 veces más CFT, respectivamente en relación a la muestra

original, mientras que para la sopa crema pasteurizada fue 5.8 veces más. Un porcentaje más bajo (28.76 %), se reportó en jugo de granada con tratamiento de termosonicación después de la bioaccesibilidad *in vitro* (Yıkılmış et al., 2022).

Los resultados generados probablemente se deban al aumento de pH en la fase intestinal, provocando la liberación de otros compuestos fenólicos (Sinela et al., 2017). También Alminger et al. (2014), menciona que los compuestos fenólicos se encuentran en formas esterificadas, glicosiladas o polimerizadas y durante la digestión se pueden hidrolizar por el ambiente ácido del estómago y el ambiente alcalino del intestino, al igual que la acción de las enzimas digestivas.

### **8.9.3 Capacidad antioxidante por ABTS, DPPH y FRAP**

El ABTS es generado tras reacciones que pueden ser químicas, enzimáticas o electroquímicas y este mide compuestos hidrofílicos y lipofílicos (Mercado-Mercado et al., 2013; Castillo-Mendoza et al., 2022). Mientras que el DPPH mide la capacidad antioxidante de compuestos poco polares, por lo que solo puede disolverse en medio orgánico (Castillo-Mendoza et al., 2022). Por otro lado, el poder antioxidante reductor férrico (FRAP), mide la capacidad de un antioxidante para reducir un oxidante, modificando el color y el grado del cambio se asocia con la concentración de la capacidad antioxidante total (Munteanu & Apetrei, 2021). La capacidad antioxidante de las sopas crema de betabel en su muestra original, se presentan en la figura 18. En ABTS no hubo diferencias significativas ( $p > 0.05$ ) entre las sopa crema pasteurizada y la control, exhibiendo datos de  $1767.32 \pm 223.69$  y  $1862.42 \pm 120.59$   $\mu\text{mol ET}/100$  g bs, respectivamente en comparación con la muestra termosonicada, la cual obtuvo valores menores ( $1590.30 \pm 45.65$   $\mu\text{mol ET}/100$  g bs) (Figura 18A). En DPPH, la sopa crema pasteurizada alcanzó cifras ( $646.41 \pm 21.14$  mol ET/100 g bs) más altas significativamente, seguido de la muestra termosonicada y el control ( $469.64 \pm 34.37$  y  $171.95 \pm 49$   $\mu\text{mol ET}/100$  g bs, respectivamente) (Figura 18B). En una sopa crema con extracto de ginseng sonicado, se mostró un comportamiento distinto para la capacidad antioxidante por ABTS y DPPH, puesto que hubo mayor capacidad en el tratamiento sonicado (Kwon, 2022). Respecto a la capacidad antioxidante por FRAP, todas las muestras presentaron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ), siendo mayor la muestra control ( $6.41 \pm 0.16$   $\mu\text{mol Fe (II)}/100$  g bs), posterior la sopa crema pasteurizada ( $5.30 \pm 0.34$   $\mu\text{mol Fe (II)}/100$  g bs) y finalmente la sopa termosonicada, quien

mostró capacidad antioxidante menor ( $4.92 \pm 0.05 \mu\text{mol Fe (II)}/100 \text{ g bs}$ ) (Figura 18C). Se reportó un comportamiento similar en un jugo de betabel termosonicado, en donde FRAP obtuvo mayores resultados en los tratamientos térmicos en comparación con el termosonicado (Ramírez-Melo et al., 2022).

Respecto a los resultados en ABTS, podría deberse a que la capacidad antioxidante de un producto se relaciona con el contenido de compuestos bioactivos y su capacidad para retardar reacciones oxidativas en el caso de la ebullición (Silva et al., 2019). Por otro lado, en el termoultrasonido se lograría alcanzar una influencia de acuerdo al tiempo de aplicación y la potencia, puesto que esto puede aumentar o disminuir la extracción de los antioxidantes (Peixoto-Araujo et al., 2021). Los efectos de la pasteurización sobre la alta capacidad antioxidante por DPPH posiblemente se debe a que durante el tratamiento térmico, se produce reacción de Millard, promoviendo la formación de compuestos con capacidad antioxidante (Zhang et al., 2018; Pérez-Hernández et al., 2013). De manera general, la baja capacidad antioxidante en la muestra termosonicada, puede ser por la sonólisis del ultrasonido, ya que se pueden formar radicales hidroxilo (-OH) y peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) durante la cavitación, provocando una disminución de antioxidantes (Castellanos et al., 2001; Tiwari et al., 2010).

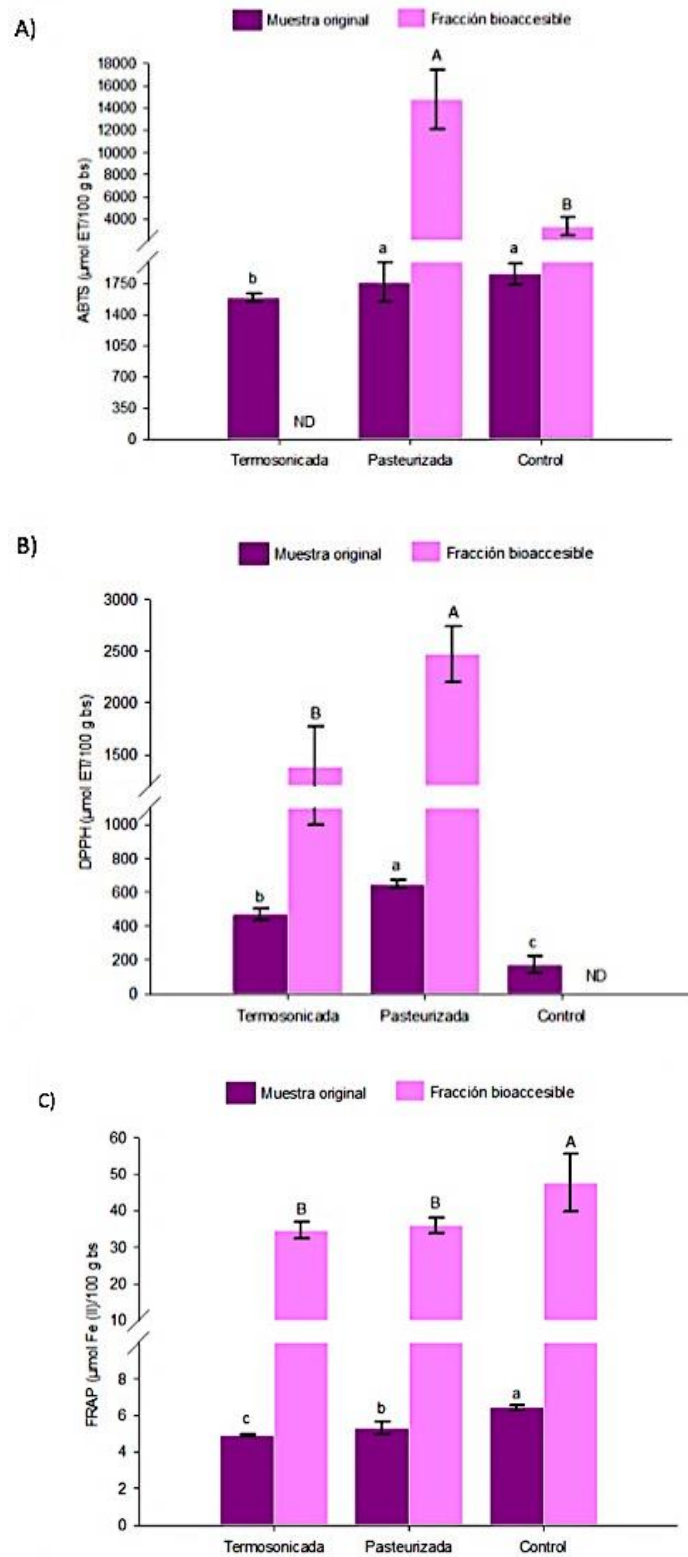


Figura 18. Capacidad antioxidante por ABTS A), DPPH B) y FRAP C), en sopas cremas. <sup>a-c</sup>Letras diferentes indican diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre las muestras originales. <sup>A-B</sup>Letras diferentes indican diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) en la fracción bioaccesible. ND: No detectado



En la figura 18A se presentan los datos de la capacidad antioxidante por ABTS en la fracción bioaccesible. La sopa crema pasteurizada obtuvo efectos más elevados ( $14761.41 \pm 2650.66 \mu\text{mol ET}/100 \text{ g bs}$ ) significativamente ( $p < 0.05$ ), en comparación con la muestra control ( $3341.22 \pm 841.01 \mu\text{mol ET}/100 \text{ g bs}$ ), mientras que la capacidad antioxidante de la sopa crema termosonicada no fue detectada. La sopa crema con respecto a la muestra original fue 8.3 y 1.7 veces más para el tratamiento pasteurizado y el control, respectivamente.

Los resultados obtenidos en la fracción bioaccesible medida por DPPH se aprecian en la figura 18B. La sopa crema pasteurizada obtuvo valores mayores significativamente ( $2470.67 \pm 268.17 \mu\text{mol ET}/100 \text{ g bs}$ ) ( $p < 0.05$ ) en comparación con la muestra termosonicada ( $1383.50 \pm 385.09 \mu\text{mol ET}/100 \text{ g bs}$ ). Cabe mencionar que en la muestra control no se encontró capacidad antioxidante. En la fracción bioaccesible, la sopa crema pasteurizada y termosonicada fue 3.8 y 2.9 veces más, respectivamente, en cuanto a su muestra original.

Por otra parte, se observa en la figura 18C la capacidad antioxidante mediante FRAP en la fracción bioaccesible. La muestra control mostró datos más altos significativamente ( $p < 0.05$ ) con  $47.65 \pm 7.80 \mu\text{mol Fe (II)}/100 \text{ g bs}$  en comparación con las otras sopas crema (pasteurizada y termosonicada), las cuales no tuvieron diferencia significativa ( $p > 0.05$ ) ( $34.64 \pm 2.30$  y  $35.94 \pm 2.05 \mu\text{mol Fe (II)}/100 \text{ g bs}$ , respectivamente). Los porcentajes para la muestra control, pasteurizada y termosoinicada fueron de 7.4, 6.7 y 7 veces más, respectivamente. Hallazgos similares fueron demostrados en un néctar de guanábana para capacidad antioxidante por ABTS y FRAP, ya que el porcentaje de capacidad antioxidante en la fracción bioaccesible fue superior al 100 % (Zafra-Rojas et al., 2023). Asimismo, en un jugo de betabel termosonicado, los valores en DPPH presentaron porcentajes mayores del 100% después de la bioaccesibilidad *in vitro* (Ramírez-Melo et al., 2022).

De manera general, la absorción de los antioxidantes mediante la barrera intestinal está influenciada por el complejo de moléculas presentes en el alimento, tales como los hidratos de carbono, lípidos y proteínas, las cuales pasan por enzimas digestivas, generando una hidrólisis parcial y a su vez liberando fenoles y betalainas con capacidad antioxidante (Palafox-Carlos, Ayala-Zavala & González-Aguilar, 2011).

En la salud humana la determinación de capacidad antioxidante es útil para evaluar la cantidad de antioxidantes presentes en un sistema del organismo y la biodisponibilidad de compuestos en el cuerpo. Asimismo, valora el impacto de las defensas antioxidantes y aspectos preventivos, como cáncer colorrectal, obesidad, diabetes y anemia (Benítez-Estrada et al., 2020; Fu et al., 2020). En el aspecto tecnológico, se utiliza para investigar los efectos de procesamiento, almacenamiento, algunas condiciones de cocción e inclusive, como método de control de calidad para detectar alteraciones en los alimentos y conservación de estos (Benzie & Choi, 2014).

## 9. Conclusiones

- Las propiedades fisicoquímicas (pH, acidez titulable, color, viscosidad, sólidos solubles totales y estabilidad física) de la sopa crema de betabel termosonicada de estudio se ajustaron al modelo matemático de superficie de respuesta, con excepción a la acidez y sólidos solubles totales.
- Las propiedades funcionales de capacidad de retención de agua y retención de glucosa de la sopa crema de betabel termosonicada, fueron las variables que se ajustaron al modelo matemático de superficie de respuesta.
- En la evaluación de compuestos y capacidad antioxidante de la sopa crema de betabel termosonicada, los parámetros que se ajustaron al modelo matemático fueron betalaínas y fenoles.
- La condición óptima de termosonicación sobre las propiedades funcionales y antioxidantes para la sopa crema de betabel fue de 82.5% de amplitud por 12 minutos con 50 segundos.
- La sopa crema con tratamiento de termosonicación presentó mejores resultados en comparación con la muestra pasteurizada, en parámetros de color ( $b^*$  y  $h^\circ$ ), viscosidad, capacidad de hinchamiento y en antioxidantes, el contenido de betalaínas y contenido fenólico total.
- En el proceso de digestión *in vitro* se presentó mayor bioaccesibilidad de compuestos antioxidantes, con porcentajes arriba del 100% en las sopas crema. Obteniendo mayor concentración en betalaínas y contenido fenólico total en la sopa termosonicada, así como en capacidad antioxidante (DPPH y FRAP), en comparación con la sopa crema pasteurizada.

*El tratamiento por termosonicación es una tecnología similar o mejor que la pasteurización, debido a que mantiene las propiedades funcionales de la sopa crema de betabel y aumenta su contenido en compuestos bioactivos, por lo que podría ser una alternativa para su aplicación en otras matrices de sopas cremas.*

## **10. Recomendaciones**

- Utilizar diferentes ingredientes para lograr viscosidad de sopa crema, sustituyendo el polvo de oca.
- Evaluar el potencial antimicrobiano de la tecnología de ultrasonido sobre la sopa crema de betabel.
- Evaluar la dosis letal de compuestos bioactivos de la sopa crema de betabel mediante un modelo animal.
- Evaluar almacenamiento de sopa crema de betabel y contenido antioxidante después de su cocción en microondas.

## 11. Referencias bibliográficas

- Aadil, R. M., Khalil, A. A., Rehman, A., Khalid, A., Inam- ur- Raheem, M., Karim, A. & Afraz, M. T. (2020). Assessing the impact of ultra- sonication and thermo- ultrasound on antioxidant indices and polyphenolic profile of apple- grape juice blend. *Journal of Food Processing and Preservation*, 44(5), 14406. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14406>
- Abid, M., Jabbar, S., Hu, B., Hashim, MM, Wu, T., Lei, S. y Zeng, X. (2014). Termosonificación como una técnica potencial para mejorar la calidad del jugo de manzana. *Ultrasonics Sonochemistry*, 21 (3), 984-990. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2013.12.003>
- Abdulstar, A. R., Altemimi, A. B. & Al-Hilphy, A. R. (2023). Exploring the power of thermosonication: a comprehensive review of its applications and impact in the food industry. *Foods*, 12(7), 1459. <https://doi.org/10.3390/foods12071459>
- Adekunle, A. O., Tiwari, B. K., Cullen, P. J., Scannell, A. G. M. & O'donnell, C. P. (2010). Effect of sonication on colour, ascorbic acid and yeast inactivation in tomato juice. *Food Chemistry*, 122(3), 500-507. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.01.026>
- Adiamo, O. Q., Ghafoor, K., Al-Juhaimi, F., Babiker, E. E., & Ahmed, I. A. M. (2018). Thermosonication process for optimal functional properties in carrot juice containing orange peel and pulp extracts. *Food Chemistry*, 245, 79-88. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.10.090>
- Aguilar-Quintana, D., Velarde-Mendivil, A. T. & Camarena-Gómez, D. M. J. (2021). Distribución comercial de una sopa tradicional con innovación. *Vértice universitario*, 23(90), 3-14. <https://doi.org/10.36792/rvu.vi90.29>
- Ahmed, F. A. & Ali, R. F. (2013). Bioactive compounds and antioxidant activity of fresh and processed white cauliflower. *BioMed Research International*, 2013(1), 367819. <https://doi.org/10.1155/2013/367819>
- Almingier, M., Aura, A.M., Bohn, T., Dufour, C., El, S.N., Gomes, S., Karakaya, S., Martínez, M.C., McDougall, G.J, Requema, T. & Santos, C.N. (2014). In vitro models for studying secondary plant metabolite digestion and bioaccessibility. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* 13:413–436. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12081>

- Alvarado-Morales, G., Minjares-Fuentes, R., Contreras-Esquivel, J. C., Montañez, J., Meza-Velázquez, J. A. & Femenia, A. (2019). Application of thermosonication for Aloe vera (*Aloe barbadensis* Miller) juice processing: Impact on the functional properties and the main bioactive polysaccharides. *Ultrasonics sonochemistry*, 56, 125-133. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.03.030>
- Anaya-Esparza, L. M., Méndez-Robles, M. D., Pérez-Larios, A., Yahia, E. & Montalvo-González, E. (2018). Nutritional composition and physicochemical parameters of thermosonicated soursop nectar. *TIP Revista especializada en ciencias químico-biológicas*, 21(1), 5-13. <https://doi.org/10.1016/j.recqb.2017.08.001>
- Andersson, J., Garrido-Banuelos, G., Bergdoll, M., Vilaplana, F., Menzel, C., Mihnea, M. & Lopez-Sanchez, P. (2022). Comparison of steaming and boiling of root vegetables for enhancing carbohydrate content and sensory profile. *Journal of Food Engineering*, 312, 110754. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110754>
- Angkasa, D., Muttalib, Y. S., Chandra, N., Ronitawati, P. & Fadly, D. (2021). Nutritional composition, sensory properties and antioxidant activity of a newly developed instant cream soup made from shrimp (*Litopenaeus vannamei*) and Beetroot (*Beta vulgaris* L.). *Current Research in Nutrition & Food Science*, 9(2), 692-699. <http://dx.doi.org/10.12944/CRNFSJ.9.2.32>
- AOAC. Official Methods of analysis of AOAC International; 920.151 (Solids total in fruits and fruit products); 940.26 (Ash of fruits and fruits products); 942.15 (acidity titrable of fruit products) 16 ed. (1999).
- Ashokkumar, M. (2011). The characterization of acoustic cavitation bubbles—an overview. *Ultrasonics Sonochemistry*, 18(4), 864-872. <http://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2010.11.016>
- Babarykin, D., Smirnova, G., Pundinsh, I., Vasiljeva, S., Krumina, G., & Agejchenko, V. (2019). Red beet (*Beta vulgaris*) impact on human health. *Journal of Biosciences and Medicines*, 7(3), 61–79. <https://doi.org/10.4236/jbm.2019.73007>
- Bach, V., Mikkelsen, L., Kidmose, U. & Edelenbos, M. (2014). Culinary preparation of beetroot (*Beta vulgaris* L.): the impact on sensory quality and

- appropriateness. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 95(9), 1852–1859. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6886>
- Bader Ul Ain, H., Saeed, F., Ahmed, A., Asif Khan, M., Niaz, B. & Tufail, T. (2019a). Improving the physicochemical properties of partially enhanced soluble dietary fiber through innovative techniques: A coherent review. *Journal of Food Processing and Preservation*, 43(4), e13917. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13917>
  - Bader Ul Ain, H., Saeed, F., Khan, M. A., Niaz, B., Rohi, M., Nasir, M. A., Tabussam, T., Anbreen, F. & Anjum, F. M. (2019b). Modification of barley dietary fiber through thermal treatments. *Food Science & Nutrition*, 7(5), 1816-1820. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1026>
  - Badui, S. (2013). *Química de los alimentos*. Ciudad de México: Pearson Educación.
  - Badui, S. (2019). *Química de los alimentos*. Ciudad de México: Pearson Educación.
  - Bali, S. & Khan, A. (2023). The untold benefits of using milk as base for traditional indian carrot “gajar-halwa” pudding. *Current Research in Complementary & Alternative Medicine*, 7, 2577-2201. [www.doi.org/10.29011/2577-2201.100204](http://www.doi.org/10.29011/2577-2201.100204)
  - Basse, E. J., Cheng, J. H. & Sun, D. W. (2022). Thermoultrasound and microwave-assisted freeze-thaw pretreatments for improving infrared drying and quality characteristics of red dragon fruit slices. *Ultrasonics Sonochemistry*, 91, 106225. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.106225>
  - Benítez-Estrada, A., Villanueva-Sánchez, J., González-Rosendo, G., Alcántar-Rodríguez, V. E., Puga-Díaz, R. & Quintero-Gutiérrez, A. G. (2020). Determinación de la capacidad antioxidante total de alimentos y plasma humano por fotoquimioluminiscencia: Correlación con ensayos fluorométricos (ORAC) y espectrofotométricos (FRAP). *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-biológicas*, 23. <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2020.0.244>
  - Benzie, I. F. & Choi, S. W. (2014). Antioxidants in food: content, measurement, significance, action, cautions, caveats, and research needs. *Advanced Food and Nutrition Research*, 71, 1-53. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800270-4.00001-8>

- Bhattad, A. (2023). Review on viscosity measurement: devices, methods and models. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 148(14), 6527-6543. <https://doi.org/10.1007/s10973-023-12214-0>
- Bot, F., Calligaris, S., Cortella, G., Plazzotta, S., Nocera, F. & Anese, M. (2018). Study on high pressure homogenization and high power ultrasound effectiveness in inhibiting polyphenoloxidase activity in apple juice. *Journal of Food Engineering*, 221, 70-76. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.10.009>
- Calva-Quintana, A. (2021). Estabilidad de betalaínas (betacianinas y betaxantinas) encapsuladas en emulsiones obtenidas con surfactantes naturales y métodos de alta energía (Tesis doctoral, Universidad Autónoma de Chihuahua).
- Carvajal-Macías, B., Pérez-Ramírez, S., Gaviria-Gaviria, Y. & Alzate-Agudelo, J. (2019). Sustitución de nitritos en un producto cárnico embutido por nabo (*Brassica rapa*) y sustitución parcial de harina de papa (*Solanum tuberosum*) por harina de cáscara de mango (*Mangifera indica*) para la evaluación del desarrollo de color y textura. *Informador técnico*, 83 (1), 19-29. <https://doi.org/10.23850/22565035.1518>
- Carvalho, L.S.B., Silva, C.S, Nóbrega, J.A, Morte, E.S.B, Santos, D.C.M.B. & Korn, M.G.A. (2020). Espectrometría de emisión óptica de plasma inducido por microondas para la determinación de múltiples elementos en sopas instantáneas. *Journal of Food Composition and Analysis*, 86, 103376. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2019.103376>
- Castellanos, M. M., Reyman, D., Sieiro, C. & Calle, P. (2001). ESR-spin trapping study on the sonochemistry of liquids in the presence of oxygen. Evidence for the superoxide radical anion formation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 8(1), 17-22. [https://doi.org/10.1016/S1350-4177\(99\)00047-4](https://doi.org/10.1016/S1350-4177(99)00047-4)
- Castillo-Mendoza, B. E., Cajas-Palacios, M. P., Montoya-Vizueté, S. N., & García-Larreta, F. S. (2022). Actividad antioxidante, polifenoles totales y tamizaje fitoquímico de chilangua (*Eryngium foetidum*). *RECIAMUC*, 6(3), 480-489. [https://doi.org/10.26820/reciamuc/6.\(3\).julio.2022.480-489](https://doi.org/10.26820/reciamuc/6.(3).julio.2022.480-489)



- Ceclu, L. & Nistor, O.V. (2020). Red beetroot: composition and health effects - A review. *Journal of Nutritional Medicine and Diet Care*, 5(2), 1-9. <https://doi.org/10.23937/2572-3278.1510043>
- Cejudo-Bastante, M. J., Hurtado, N., Delgado, A., & Heredia, F. J. (2016). Impact of pH and temperature on the colour and betalain content of Colombian yellow pitaya peel (*Selenicereus megalanthus*). *Journal of Food Science and Technology*, 53, 2405-2413. <https://doi.org/10.1007/s13197-016-2215-y>
- Charley, H. (2012). *Tecnología de alimentos*. Procesos químicos y físicos en la preparación de alimentos, Ciudad de México, Limusa.
- Chau, C., Huang, Y. & Lee, M. (2003). *In vitro* hypoglycemic effects of different insoluble fiber-rich fractions prepared from the peel of Citrus sinensis L. cv. Liucheng. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51(22), 6623-6626. <https://doi.org/10.1021/jf000574n>
- Chauhan, S. P., Sheth, S. R., Rathod, I. S., Suhagia, B. N. & Maradia, R. B. (2013). Analysis of betalains from fruits of Opuntia species. *Journal Phytochemistry*, 12, 35-45. <https://doi.org/10.1007/s11101-012-9248-2>
- Chen, M.S., Zhao, Z.G., Meng, H. & Yu, S. (2017). The antibiotic activity and mechanisms of sugar beet (*Beta vulgaris*) molasses polyphenols against selected food-borne pathogens. *Food Science and Technology*, 82, 354-360. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.04.063>
- Chhikara, N., Kushwaha, K., Sharma, P., Gat, Y. & Panghal, A. (2018). Bioactive compounds of beetroot and utilization in food processing industry: A critical review. *Food Chemistry*, 272, 192-200. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.08.022>
- Chhikara, N., Kushwaha, K., Jaglan, S., Sharma, P., & Panghal, A. (2019). Nutritional, physicochemical, and functional quality of beetroot (*Beta vulgaris* L.) incorporated Asian noodles. *Cereal Chemistry*, 96(1), 154-161. <https://doi.org/10.1002/cche.10126>
- Cicco, N., Lanorte, M., Paraggio, M., Viggiano, M. & Lattanzio, V. (2009). A reproducible, rapid and inexpensive Folin-Ciocalteu micro-method in determining phenolics of plant methanol extracts. *Microchemical Journal*, 91(1), 107-110. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2008.08.011>

- Comisión del Codex Alimentarius (2009). Lista de métodos para la determinación de la fibra dietética [CAC/GL 23-1997]. Obtenido de ([https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/sh-proxy/en/?Ink=1&url=https%253A%252F%252Fworkspace.fao.org%252Fsites%252Fcodex%252FShared%2BDocuments%252FArchive%252FMeetings%252FFCCNFSDU%252Fccnfsdu31%252Fnf31\\_03s.pdf](https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/sh-proxy/en/?Ink=1&url=https%253A%252F%252Fworkspace.fao.org%252Fsites%252Fcodex%252FShared%2BDocuments%252FArchive%252FMeetings%252FFCCNFSDU%252Fccnfsdu31%252Fnf31_03s.pdf))
- Costa, M. G. M., Fonteles, T. V., de Jesus, A. L. T., Almeida, F. D. L., de Miranda, M. R. A., Fernandes, F. A. N. & Rodrigues, S. (2013). High-intensity ultrasound processing of pineapple juice. *Food and Bioprocess Technology*, 6, 997-1006. <https://doi.org/10.1007/s11947-011-0746-9>
- Coultate, T.P. (2007). Manual de química y bioquímica de los alimentos. Acribia. Zaragoza.
- Coy-Barrera, E. (2020). Analysis of betalains (betacyanins and betaxanthins). Recent advances in natural products analysis (pp. 593-619). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816455-6.00017-2>
- Cruz-Cansino, N., Ramírez-Moreno, E., León-Rivera, J. E., Delgado-Olivares, L., Alanís-García, E., Ariza-Ortega, J. A., & Jaramillo-Bustos, D. P. (2015). Shelf life, physicochemical, microbiological and antioxidant properties of purple cactus pear (*Opuntia ficus indica*) juice after thermoultrasound treatment. *Ultrasonics Sonochemistry*, 27, 277-286. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.05.040>
- Cui, J., Lian, Y., Zhao, C., Du, H., Han, Y., Gao, W. & Zheng, J. (2019). Dietary fibers from fruits and vegetables and their health benefits via modulation of gut microbiota. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 18(5), 1514-1532. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12489>
- Dahl, W. J. & Stewart, M. L. (2015). Position of the Academy of Nutrition and Dietetics: health implications of dietary fiber. *Journal of the Academy of Nutrition and Dietetics*, 115(11), 1861-1870. <https://doi.org/10.1016/j.jand.2015.09.003>
- Damunupola, D. A. P. R., Weerathilake, W. A. D. V., & Sumanasekara, G. S. (2014). Evaluation of quality characteristics of goat milk yogurt incorporated with beetroot juice. *International Journal of Scientific and*

- Research Publications*, 4(10), 1-5. Recuperado de <https://www.ijr.org/research-paper-1014/ijr-p3487.pdf>
- Dhingra, D., Michael, M., Rajput, H. & Patil, R. T. (2012). Dietary fibre in foods: a review. *Journal of Science and Technology*, 49, 255-266. <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0365-5>
  - Di Lorenzo, C., Colombo, F., Biella, S., Stockley, C. & Restani, P. (2021). Polyphenols and human health: The role of bioavailability. *Nutrients*, 13(1), 273. <https://doi.org/10.3390/nu13010273>
  - Durán-Cabral, M., Fernández-Jalao, I., Estévez-Santiago, R., & Olmedilla-Alonso, B. (2017). Assessment of individual carotenoid and vitamin A dietary intake in overweight and obese Dominican subjects. *Nutrición Hospitalaria*, 34(2), 407-415. <http://dx.doi.org/10.20960/nh.689>
  - Echevarria, J. R. L. (2017). Alimentos hipolipemiantes que mejoran la salud cardiovascular. *Revista Cubana de Cardiología y Cirugía Cardiovascular*, 23(4), 549-582. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7162557>
  - Enaru, B., Dreţcanu, G., Pop, TD, Stănilă, A. & Diaconeasa, Z. (2021). Antocianinas: factores que afectan su estabilidad y degradación. *Antioxidants*, 10 (12), 1967. <https://doi.org/10.3390/antiox10121967>
  - Esatbeyoglu, T., Wagner, A. E., Motafakkerazad, R., Nakajima, Y., Matsugo, S. & Rimbach, G. (2014). Free radical scavenging and antioxidant activity of betalain: Electron spin resonance spectroscopy studies and studies in cultured cells. *Journal Food and Chemical Toxicology*, 73, 119–126. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2014.08.007>
  - Esquivel, P. (2024). *Betalains*. In Handbook on natural pigments in food and beverages (pp. 147-167). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99608-2.00002-1>
  - Eswaran, S., Muir, J., & Chey, W. D. (2013). Fiber and functional gastrointestinal disorders. *Official journal of the American College of Gastroenterology*, 108(5), 718-727. <https://doi.org/10.1038/ajg.2013.63>
  - Farabegoli, F., Scarpa, E. S., Frati, A., Serafini, G., Papi, A., Spisni, E., Antonini, E., Benedetti, S. & Ninfali, P. (2017). Betalains increase vitexin-2-

- O-xyloside cytotoxicity in CaCo-2 cancer cells. *Journal Food Chemistry*, 218, 356-364. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.09.112>
- Femenia, A., Lefebvre, A., Thebaudin, J., Robertson, J. & Bourgeois, C. (2006). Physical and sensory properties of model foods supplemented with cauliflower fiber. *Journal of Food Science*, 62(4), 635-639. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1997.tb15426.x>
  - Feng, X., Pan, L., Wang, Q., Liao, Z., Wang, X., Zhang, X., Guo, W., Hu, E., Li, J., Xu, J., Wu, F. & Lu, Y. (2020). Nutritional and physicochemical characteristics of purple sweet corn juice before and after boiling. *PLoS One*, 15(5), e0233094. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0233094>
  - Fernandes de Araujo, F., de Paulo Farias, D., Neri-Numa, I. A., Dias-Audibert, F. L., Delafiori, J., de Souza, F. G. & Pastore, G. M. (2021). Influence of high-intensity ultrasound on color, chemical composition and antioxidant properties of araçá-boi pulp. *Food Chemistry*, 338, 127747. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127747>
  - Fernández-López, J., Botella-Martínez, C., Navarro-Rodríguez de Vera, C., Sayas-Barberá, M. E., Viuda-Martos, M., Sánchez-Zapata, E., & Pérez-Álvarez, J. A. (2020). Vegetable soups and creams: Raw materials, processing, health benefits, and innovation trends. *Plants*, 9(12), 1769. <https://doi.org/10.3390/plants9121769>
  - Fernando, G. S. N., Wood, K., Papaioannou, E. H., Marshall, L. J., Sergeeva, N. N. & Boesch, C. (2021). Application of an ultrasound-assisted extraction method to recover betalains and polyphenols from red beetroot waste. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 9(26), 8736–8747. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.1c01203>
  - Firouz, M., Farahmandi, A. & Soleiman H. (2019). Recent advances in ultrasound application as a novel technique in analysis, processing and quality control of fruits, juices and dairy products industries: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 57, 73–88. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.05.014>
  - Fu, Y., Shi, J., Xie, S.Y., Zhang, T.Y., Soladoye, O. P. & Aluko, R. E. (2020). Red beetroot betalains: perspectives on extraction, processing, and potential health benefits. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. <https://dx.doi.org/10.1021/acs.jafc.0c04241>

- Fuller, S., Beck, E., Salma, H. & Tapsell, L. (2016). New horizons for the study of dietary fiber and health: a review. *Journal plant foods for human nutrition*, 71(1): 1-12. <https://doi.org/10.1007/s11130-016-0529-6>
- Furlotti, M. C., Jaure, M. C., & Agnesio, M. R. (2024). *Técnicas culinarias: primeras orientaciones en Nutrición*. Editorial UCALP.
- Gan, R. Y., Chan, C. L., Yang, Q. Q., Li, H. B., Zhang, D., Ge, Y., Gunaratne, A., Ge, J. & Corke, H. (2019). Bioactive compounds and beneficial functions of sprouted grains. *In Sprouted grains* (pp. 191-246). AACC International Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811525-1.00009-9>
- Grabitske, H. A., & Slavin, J. L. (2009). Gastrointestinal effects of low-digestible carbohydrates. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 49(4), 327-360. <https://doi.org/10.1080/10408390802067126>
- Guan, Z. W., Yu, E. Z. & Feng, Q. (2021). Soluble dietary fiber, one of the most important nutrients for the gut microbiota. *Molecules*, 26(22), 6802. <https://doi.org/10.3390/molecules26226802>
- Guevara-Mojica, M. F. (2020). Efecto del tiempo de sonicación sobre los principales carotenoides, actividad antioxidante lipofílica y color de jugo de naranja. (Tesis de licenciatura). Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio.
- Hashemi, S. M. B., Mousavi Khaneghah, A., Fidelis, M. & Granato, D. (2018). Effects of pulsed thermosonication treatment on fungal growth and bioactive compounds of *Berberis vulgaris* juice. *International Journal of Food Science & Technology*, 53(7), 1589-1596. <https://doi.org/10.1111/ijfs.13740>
- Hassan, Z. M. R., El Din, H. M. F., Ali, A. A., Mehanna, N. S. & El-Messery, T. M. (2013). Interaction of some low molecular weight phenolics with milk proteins. *World Applied Sciences Journal*, 23(2), 182-187. <https://doi.org/10.5829/idosi.wasj.2013.23.02.13057>
- Hazra, T., Sindhav, R., Sudheendra, C. V., Bumbadiya, M., Govani, R. & Ramani, V. (2021). A comparative study on the effects of boiling and ultrasonication on radical scavenging activity, casein particle size, and whiteness of milk. *Veterinary World*, 14(7), 1784. <https://doi.org/10.14202/vetworld.2021.1784-1787>

- He, Y., Li, W., Zhang, X., Li, T., Ren, D. & Lu, J. (2020). Physicochemical, functional, and microstructural properties of modified insoluble dietary fiber extracted from rose pomace. *Journal of Food Science and Technology*, 57, 1421-1429. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-04177-8>
- He, Y., Wang, B., Wen, L., Wang, F., Yu, H., Chen, D., Xin, S. & Zhang, C. (2022). Effects of dietary fiber on human health. *Food Science and Human Wellness*, 11 (1), 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.fshw.2021.07.001>
- Hernández-Falcón, T. A., Monter-Arciniega, A., del Socorro Cruz-Cansino, N., Alanís-García, E., Rodríguez-Serrano, G. M., Castañeda-Ovando, A., García-Garibay, M., Ramírez-Moreno, E. & Jaimez-Ordaz, J. (2018). Effect of thermoultrasound on aflatoxin M1 levels, physicochemical and microbiological properties of milk during storage. *Ultrasonics Sonochemistry*, 48, 396-403. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.06.018>
- Hernández, H.R. (2021). Efecto de tipo de secado en las características nutrimentales de la harina de *Beta vulgaris* para la elaboración de un pan funcional. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/handle/123456789/47695>
- Holovko, T., Bordunova, O., Bolhova, N., Vasylenko, O., Nazarenko, Y., & Prymenko, V. (2023). Sponge cake enriched with beetroot powder and chard puree: nutritional and sensory qualities. *Food Science and Technology*, 48, 12-20. <https://doi.org/10.15673/fst.v17i1.2558>
- Hotchkiss Jr, A. T., Chau, H. K., Strahan, G. D., Nuñez, A., Simon, S., White, A. K. & Hirsch, J. (2022). Structural characterization of red beet fiber and pectin. *Food Hydrocolloids*, 129, 107549. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.107549>
- Huang, L., Zhang, W., Cheng, J. & Lu, Z. (2019). Antioxidant and physicochemical properties of soluble dietary fiber from garlic straw as treated by energy-gathered ultrasound. *International Journal of Food Properties*, 22(1), 678-688. <https://doi.org/10.1080/10942912.2019.1600544>
- Ibrahim, O. O. (2020). Thermal and nonthermal food processing technologies for food preservation and their effects on food chemistry and nutritional values. *EC Nutrition*, 15, 88-105. Recuperado de <https://ecronicon.net/assets/ecnu/pdf/ECNU-15-00850.pdf>

- Igbokwe, Q. N., Okoye, J. I., & Egbujie, A. E. (2024). Effect of thermal processing treatments on the proximate, functional and pasting properties of African yam bean (*Sphenostylis stenocarpa*) seed flours. *Asian Journal of Food Research and Nutrition*, 3(2), 329-342. Recuperado de <https://www.journalajfrn.com/index.php/AJFRN/article/view/136>
- Islam, M., Sarker, M. N. I., Islam, M. S., Prabakusuma, A. S., Mahmud, N., Fang, Y. & Xia, W. (2018). Development and quality analysis of protein enriched instant soup mix. *Food and Nutrition Sciences*, 9(6), 663-675. <https://doi.org/10.4236/fns.2018.96050>
- Izadifar, Z., Babyn, P. & Chapman, D. (2019). Ultrasound cavitation/microbubble detection and medical applications. *Journal of Medical and Biological Engineering*, 39, 259-276. <https://doi.org/10.1007/s40846-018-0391-0>
- Jones, J.M. (2013). Tendencias futuras de la fibra dietética: integración de nuevas definiciones y hallazgos para informar la investigación y la comunicación sobre nutrición. *Advances in Nutrition*, 4(1), 8-15. <https://doi.org/10.3945/an.112.002907>
- Kalla-Bertholdt, A. M., Baier, A. K. & Rauh, C. (2023). Potential of modification of techno-functional properties and structural characteristics of citrus, apple, oat, and pea dietary fiber by high-intensity ultrasound. *Foods*, 12(19), 3663. <https://doi.org/10.3390/foods12193663>
- Karaman, E., Yilmaz, E. & Tuncel, N. B. (2017). Physicochemical, microstructural and functional characterization of dietary fibers extracted from lemon, orange and grapefruit seeds press meals. *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*, 11, 9-17. <https://doi.org/10.1016/j.bcdf.2017.06.001>
- Kaur, S., Kaur, N., Aggarwal, P. & Grover, K. (2022). Atributos sensoriales, compuestos bioactivos, actividad antioxidante y valores de color de mermeladas y dulces elaborados a partir de remolacha (*Beta vulgaris* L.). *Journal of Applied and Natural Science*, 14 (2), 459-468. <https://doi.org/10.31018/jans.v14i2.3407>
- Kentish, S., & Ashokkumar, M. (2010). The physical and chemical effects of ultrasound. In *Ultrasound technologies for food and bioprocessing* (pp. 1-

- 12). New York, NY: Springer New York. [https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7472-3\\_1](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7472-3_1)
- Kidoń, M. & Uwineza, P. A. (2022). New smoothie products based on pumpkin, banana, and purple carrot as a source of bioactive compounds. *Molecules*, 27(10), 3049. <https://doi.org/10.3390/molecules27103049>
  - Knorr, D., Zenker, M., Heinz, V. & Lee, D. U. (2004). Applications and potential of ultrasonics in food processing. *Trends in Food Science & Technology*, 15(5), 261–266. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2003.12.001>
  - Kobus, Z., Osmólska, E., Starek-Wójcicka, A., & Krzywicka, M. (2023). Effect of High-Powered Ultrasound on Bioactive Compounds and Microbiological Stability of Juices. *Applied Sciences*, 13(19), 10961. <https://doi.org/10.3390/app131910961>
  - Kuskoski, E., Asuero, A., Troncoso, A., Mancini-Filho, J. & Fett, R. (2005). Aplicación de diversos métodos químicos para determinar actividad antioxidante en pulpa de frutos. *Food Science and Technology*, 25(4), 726–732. <https://doi.org/10.1590/S0101-20612005000400016>
  - Kwon, K. S., Shabbir, U., Cha, S. H. & Jang, K. I. (2022). Effect of ginseng powder supplementation on the physicochemical properties, antioxidant capacity, and sensory characteristics of cream soup. *Foods*, 11(9), 1193. <https://doi.org/10.3390/foods11091193>
  - Lambert, J. E., Parnell, J. A., Tunnicliffe, J. M., Han, J., Sturzenegger, T. & Reimer, R. A. (2017). Consuming yellow pea fiber reduces voluntary energy intake and body fat in overweight/obese adults in a 12-week randomized controlled trial. *Clinical Nutrition*, 36(1), 126-133. <https://doi.org/10.1016/j.clnu.2015.12.016>
  - Lattimer, J. M., & Haub, M. D. (2010). Effects of dietary fiber and its components on metabolic health. *Nutrients*, 2(12), 1266-1289. <https://doi.org/10.3390/nu2121266>
  - Li, J., Cheng, H., Liao, X., Liu, D., Xiang, Q., Wang, J. & Ding, T. (2019). Inactivation of *Bacillus subtilis* and quality assurance in Chinese bayberry (*Myrica rubra*) juice with ultrasound and mild heat. *Food Science and Technology*, 108, 113-119. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.03.061>
  - López-Martínez, L. X., Campos-González, N., Zamora-Gasga, V. M., Domínguez-Avila, J. A., Pareek, S., Villegas-Ochoa, M. A., Sáyago-Ayerdi,



- S.G. & González-Aguilar, G. A. (2022). Optimization of ultrasound treatment of beverage from mango and carrot with added turmeric using response surface methodology. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 72(3), 287-296. <https://doi.org/10.31883/pjfn/186589>
- López-Torres, L. P. & López-Alcaraz, F. (2022). Los productos ultra-procesados: Implicancias sobre su consumo, avances y retos en América Latina para la salud pública en adultos. *Revista Chilena de Nutrición*, 49(5), 637-643. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-75182022000600637>
  - Luo, X., Wang, Q., Zheng, B., Lin, L., Chen, B., Zheng, Y. & Xiao, J. (2017). Hydration properties and binding capacities of dietary fibers from bamboo shoot shell and its hypolipidemic effects in mice. *Food and Chemical Toxicology*, 109, 1003-1009. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2017.02.029>
  - Madalão, M. C., Lima, E. M., Benincá, D., Saraiva, S. H., Carvalho, R. V. & Silva, P. I. (2021). Extraction of bioactive compounds from juçara pulp (*Euterpe edulis* M.) is affected by ultrasonic power and temperature. *Ciência e Agrotecnologia*, 45. <https://doi.org/10.1590/1413-705420214502482>
  - Mai, T. H., Tran, T. T. & Le, V. V. (2023). Effects of pitaya peel supplementation on nutritional quality, overall sensory acceptance, in vitro glycemic index, and antioxidant release from fiber- enriched cookies. *Journal of Food Quality*, 2023(1), 3166524. <https://doi.org/10.1155/2023/3166524>
  - Majzoubi, M. & Farahnaky, A. (2021). Granular cold-water swelling starch; properties, preparation and applications, a review. *Food Hydrocolloids*, 111, 106393. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106393>
  - Malien-Aubert, C., Dangles, O. & Amiot, M. J. (2000). Color stability of commercial anthocyanin-based extracts in relation to the phenolic composition. protective effects by intra- and intermolecular copigmentation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49(1), 170–176. <https://doi.org/10.1021/jf000791o>
  - Manzoor, M. F., Xu, B., Khan, S., Shukat, R., Ahmad, N., Imran, M., Rehman, A., Karrar, E., Aadil, M. & Korma, S. A. (2021). Impact of high-intensity thermosonication treatment on spinach juice: Bioactive

- compounds, rheological, microbial, and enzymatic activities. *Ultrasonics Sonochemistry*, 78, 105740. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105740>
- Maraie, N. K., Abdul-Jalil, T. Z., Alhamdany, A. T. & Janabi, H. A. (2014). Phytochemical study of the Iraqi *Beta vulgaris* leaves and its clinical applications for the treatment of different dermatological diseases. *World Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*, 3, 5-19. Recuperado de [https://www.researchgate.net/profile/Anas-Alhamdany/publication/290296603\\_PHYTOCHEMICAL\\_STUDY\\_OF\\_THE\\_IRAQI\\_BETA\\_VULGARIS\\_LEAVES\\_AND\\_ITS\\_CLINICAL\\_APPLICATIONS\\_FOR\\_THE\\_TREATMENT\\_OF\\_DIFFERENT\\_DERMATOLOGICAL\\_DISEASES/links/5695f83908ae820ff074ea7d/PHYTOCHEMICAL-STUDY-OF-THE-IRAQI-BETA-VULGARIS-LEAVES-AND-ITS-CLINICAL-APPLICATIONS-FOR-THE-TREATMENT-OF-DIFFERENT-DERMATOLOGICAL-DISEASES.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Anas-Alhamdany/publication/290296603_PHYTOCHEMICAL_STUDY_OF_THE_IRAQI_BETA_VULGARIS_LEAVES_AND_ITS_CLINICAL_APPLICATIONS_FOR_THE_TREATMENT_OF_DIFFERENT_DERMATOLOGICAL_DISEASES/links/5695f83908ae820ff074ea7d/PHYTOCHEMICAL-STUDY-OF-THE-IRAQI-BETA-VULGARIS-LEAVES-AND-ITS-CLINICAL-APPLICATIONS-FOR-THE-TREATMENT-OF-DIFFERENT-DERMATOLOGICAL-DISEASES.pdf)
  - Maran, J. P., Priya, B. & Nivetha, V. (2015). Optimization of ultrasound-assisted extraction of natural pigments from Bougainvillea glabra flowers. *Industrial Crops and Products*, 63, 182–189. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.09.059>
  - Martínez-Las Heras, R., Landines, E. F., Heredia, A., Castelló, M. L. & Andrés, A. (2017). Influence of drying process and particle size of persimmon fibre on its physicochemical, antioxidant, hydration and emulsifying properties. *Journal of Food Science and Technology*, 54, 2902-2912. <https://doi.org/10.1007/s13197-017-2728-z>
  - McRorie Jr, J. W. & McKeown, N. M. (2017). Understanding the physics of functional fibers in the gastrointestinal tract: an evidence-based approach to resolving enduring misconceptions about insoluble and soluble fiber. *Journal of the Academy of Nutrition and Dietetics*, 117(2), 251-264. <https://doi.org/10.1016/j.jand.2016.09.021>
  - Mercado-Mercado, G., Rosa Carrillo, L. D. L., Wall-Medrano, A., López Díaz, J. A. & Álvarez-Parrilla, E. (2013). Compuestos polifenólicos y capacidad antioxidante de especias típicas consumidas en México. *Nutrición Hospitalaria*, 28(1), 36-46. <https://dx.doi.org/10.3305/nh.2013.28.1.6298>

- Meza-García, M. (2011). Disturbios del estado ácido-básico en el paciente crítico. *Acta Médica Peruana*, 28(1), 46-55. Recuperado de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=96620901008>
- Miller, G. L. (1959). Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. *Analytical Chemistry*, 31(3), 426–428. <https://doi.org/10.1021/ac60147a030>
- Moorthy, I. G., Maran, J. P., Muneeswari, S., Naganyashree, S. & Shivamathi, C. S. (2015). Response surface optimization of ultrasound assisted extraction of pectin from pomegranate peel. *International Journal of Biological Macromolecules*, 72, 1323-1328. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2014.10.037>
- Morales, F. & Jiménez-Pérez, S. (2001). Free radical scavenging capacity of Maillard reaction products as related to colour and fluorescence. *Food Chemistry*, 72(1), 119-125. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(00\)00239-9](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(00)00239-9)
- Moreno-Rodas, C. A., Hernández-Anguiano, A. M., Aranda-Ocampo, S., Suárez-Espinosa, J., Landa-Salgado, P. & Castro-Rosas, J. (2021). Efecto de soluciones antimicrobianas en poblaciones de salmonella y color de cladodios de nopal verdura. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 44(1), 77–77. <https://doi.org/10.35196/rfm.2021.1.77>
- Morozov, S., Isakov, V. & Konovalova, M. (2018). Fiber-enriched diet helps to control symptoms and improves esophageal motility in patients with non-erosive gastroesophageal reflux disease. *World Journal of Gastroenterology*, 24(21), 2291. <https://doi.org/10.3748/wjg.v24.i21.2291>
- Mudgil, D. (2017). The interaction between insoluble and soluble fiber. In *Dietary fiber for the prevention of cardiovascular disease* (pp. 35-59). Academic press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805130-6.00003-3>
- Mukhtar, K., Nabi, B. G., Manzoor, M. F., Zia, S., Bhat, Z. F., Hussain, S. & Aadil, R. M. (2024). Impact of thermal, ultrasonication, and thermosonication processes on the quality profile of watermelon- beetroot juice blend: a comparative study. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2024(1), 5518914. <https://doi.org/10.1155/2024/5518914>
- Munteanu, I. G. & Apetrei, C. (2021). Analytical methods used in determining antioxidant activity: A review. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(7), 3380. <https://doi.org/10.3390/ijms22073380>

- Nabi, B. G., Mukhtar, K., Ahmed, W., Manzoor, M. F., Ranjha, M. M. A. N., Kieliszek, M. & Aadil, R. M. (2023). Natural pigments: Anthocyanins, carotenoids, chlorophylls, and betalains as colorants in food products. *Food Bioscience*, 52, 102403. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102403>
- Nirmal, N.P., Mereddy, R. & Maqsood, S (2021). Recent developments in emerging technologies for beetroot pigment extraction and its food applications. *Food Chemistry*, 356, 129611. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129611>
- Ojha, K. S., Tiwari, B. K. & O'Donnell, C. P. (2018). Effect of Ultrasound Technology on Food and Nutritional Quality. *Advances in Food and Nutrition Research*, 84, 207-240. <https://doi.org/10.1016/bs.afnr.2018.01.001>
- Oladunjoye, A. O., Adeboyejo, F. O., Okekunbi, T. A. & Aderibigbe, O. R. (2021). Effect of thermosonication on quality attributes of hog plum (*Spondias mombin* L.) juice. *Ultrasonics Sonochemistry*, 70, 105316. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105316>
- O'sullivan, J., Murray, B., Flynn, C. & Norton, I. (2016). The effect of ultrasound treatment on the structural, physical and emulsifying properties of animal and vegetable proteins. *Food Hydrocolloids*, 53, 141-154. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.02.009>
- Ou, S., Kwok, K., Li, Y. & Fu, L. (2001). In vitro study of possible role of dietary fiber in lowering postprandial serum glucose. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49(2), 1026 - 1029. <https://doi.org/10.1021/jf000574n>
- Ozcan, T., Akpinar-Bayazit, A., Yilmaz-Ersan, L. & Delikanli, B. (2014). Phenolics in human health. *International Journal of Chemical Engineering and Applications*, 5(5), 393-396. <https://doi.org/10.7763/IJCEA.2014.V5.416>
- Palafox-Carlos, H., Ayala-Zavala, F. & González-Aguilar, G.A. (2011). The role of dietary fiber in the bioaccessibility and bioavailability of fruit and vegetable antioxidants. *Journal of Food Science*, 76, 6–15. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2010.01957.x>
- Peixoto-Araujo, N. M., Keven-Silva, E., Silvano-Arruda, H., Rodrigues-de Moraes, D., Meireles, M. A., Araujo-Pereira, G. & Pastore, G. M. (2021). Recovering phenolic compounds from *Eugenia calycina* Cambess

employing high-intensity ultrasound treatments: A comparison among its leaves, fruit pulp, and seed as promising sources of bioactive compounds. *Separation and Purification Technology*, 272, 118920. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.118920>

- Pérez-Hernández, L. M., Chávez-Quiroz, K., Medina-Juárez, L. Á. & Meza, N. G. (2013). Compuestos fenólicos, melanoidinas y actividad antioxidante de café verde y procesado de las especies *Coffea arabica* y *Coffea canephora*. *BIOtecnia*, 15(1), 51-56. <https://doi.org/10.18633/bt.v15i1.136>
- Perumpuli P.A.B.N., Fernando G.S.N., Kaumal K.M., Arandara M. & Silva S.W.M. (2018). Development of low sugar vegetable jam from beetroot (*Beta vulgaris* L.): Studies on physicochemical sensory and nutritional properties. *International Journal of Theoretical and Applied Sciences*, 10, 22-27. Recuperado de [https://www.researchtrend.net/ijtas/pdf/Development%20of%20Low%20Sugar%20Vegetable%20Jam%20from%20Beetroot%20\(Beta%20vulgaris%20L\)%20Studies%20on%20Physicochemical%20Sensory%20and%20Nutritional%20Properties%20PERUMPULI%20PABN.pdf](https://www.researchtrend.net/ijtas/pdf/Development%20of%20Low%20Sugar%20Vegetable%20Jam%20from%20Beetroot%20(Beta%20vulgaris%20L)%20Studies%20on%20Physicochemical%20Sensory%20and%20Nutritional%20Properties%20PERUMPULI%20PABN.pdf)
- Pisoschi, A. M., & Negulescu, G. P. (2011). Methods for total antioxidant activity determination: a review. *Biochemistry & Analytical Biochemistry*, 1(1), 106. <https://doi.org/10.4172/2161-1009.1000106>
- Preczenhak, A. P., Orsi, B., Lima, G. P. P., Tezotto-Uliana, J. V., Minatel, I. O. & Kluge, R. A. (2019). Cysteine enhances the content of betalains and polyphenols in fresh-cut red beet. *Food Chemistry*, 286, 600–607. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.02.040>
- PROFECO. (2022). Encuentra Profeco sopas cremas envasadas casi sin verdura Recuperado 28 mayo 2023, de <https://www.gob.mx/profeco/prensa/encuentra-profeco-sopas-cremas-ensadas-casi-sin-verdura>
- Punia, S., Singh, A., Chaudhary, V., Sharma N. & Lorenzo J.M. (2022). La remolacha como ingrediente novedoso para sus versátiles aplicaciones alimentarias. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 63(26), 8403-8427. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2055529>

- Qi, J., Li, Y., Masamba, K. G., Shoemaker, C. F., Zhong, F., Majeed, H., & Ma, J. (2016). The effect of chemical treatment on the in vitro hypoglycemic properties of rice bran insoluble dietary fiber. *Food Hydrocolloids*, 52, 699-706. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.08.008>
- Raghavendra, S., Ramachandra-Swamy, S., Rastogi, N., Raghavarao, K., Kumar, S. y Tharanathan, R. (2006). Grinding characteristics and hydration properties of coconut residue: A source of dietary fiber. *Journal of Food Engineering*, 72(3), 281-286. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.12.008>
- Ramírez-Melo, LM, del Socorro Cruz-Cansino, N., Delgado-Olivares, L., Ramírez-Moreno, E., Zafra-Rojas, QY, Hernandez-Traspenna, JL, & Suarez-Jacobo, A. (2022). Optimization of antioxidant activity properties of a thermosonicated beetroot (*Beta vulgaris* L.) juice and further in vitro bioaccessibility comparison with thermal treatments. *Food Science and Technology*, 154, 112780. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112780>
- Ramírez-Moreno, E., Zafra-Rojas, Q., Arias-Rico, J., Ariza-Ortega, J., Alanís-García, E. y Cruz-Cansino, N. (2018). Effect of ultrasound on microbiological load and antioxidant properties of blackberry juice. *Journal of Food Processing and Preservation*, 42(2), 1-6. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13489>
- Ramírez-Ramos, M., García-Mateos, M., Corrales-García, J., Ybarra-Moncada, C. & Castillo-González, A. M. (2015). Compuestos antioxidantes en variedades pigmentadas de tuna (*Opuntia* sp.). *Revista Fitotecnia Mexicana*, 38(4), 349-357. Recuperado de [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0187-73802015000400002](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802015000400002)
- Rebecca, L. J., Sharmila, S., Das, M. P., & Seshiah, C. (2014). Extraction and purification of carotenoids from vegetables. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 6(4), 594-598. Recuperado de <https://www.jocpr.com/articles/extraction-and-purification-of-carotenoids-from-vegetables.pdf>
- Reyes-Buendía, C., Corrales-García, J. E., Peña-Valdivia, C. B., Hernández-Montes, A. & Ybarra-Moncada, M. (2020). Sopa de elote (*Zea mays*) tipo crema con mucílago de nopal (*Opuntia* spp.) como espesante, sus características físicas y aceptación sensorial. *TIP Revista*

- Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 23(1), 1–14.  
<https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2020.0.257>
- Robles-Ozuna, L. & Ochoa-Martínez, L., (2012). Ultrasonido y sus aplicaciones en el procesamiento de alimentos. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 13(2), 109–122. Recuperado de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81325441002>
  - Rocha, C. B. & Noreña, C. P. Z. (2020). Microwave-assisted extraction and ultrasound-assisted extraction of bioactive compounds from grape pomace. *International Journal of Food Engineering*, 16(1-2), 20190191. <https://doi.org/10.1515/ijfe-2019-0191>
  - Saldaña-Cejudo, P., Bastida, S., Macho-González, A. & Sánchez-Muniz, F. J. (2020). Alimentos funcionales como alternativa para incrementar la ingesta de fibra dietética y proantocianidinas. Posibles efectos sobre la microbiota intestinal. *Journal of Negative and No Positive Results*, 5(12), 1575-1598. <https://doi.org/10.19230/jonnpr.39907>
  - Salehi, F. (2020). Physicochemical characteristics and rheological behaviour of some fruit juices and their concentrates. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 14, 2472–2488. <https://doi.org/10.1007/s11694-020-00495-0>
  - Sánchez-Bravo, P., Noguera-Artiaga, L., Gómez-López, V. M., Carbonell-Barrachina, Á. A., Gabaldón, J. A. & Pérez-López, A. J. (2022). Impact of non-thermal technologies on the quality of nuts: A review. *Foods*, 11(23), 3891. <https://doi.org/10.3390/foods11233891>
  - Sánchez-Moreno, C., González-Peña, D., Colina-Coca, C. & Ancos, B. D. (2018). Métodos físicos no tradicionales de control microbiológico aplicables al proceso de elaboración de hortalizas de IV Gama. *Agrociencia (Uruguay)*, 22(1), 26-36. <https://doi.org/10.31285/agro.22.1.3>
  - Sardana, R. K., Chhikara, N., Tanwar, B., & Panghal, A. (2018). Dietary impact on esophageal cancer in humans: a review. *Food & Function*, 9(4), 1967-1977. <https://doi.org/10.1039/C7FO01908D>
  - Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER). 2020. Betabel, el color de la tierra. Recuperado 20 de marzo, 2023 de <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/betabel-el-color-de-la-tierra?idiom=es>

- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER). 2022. Llegó la hora de disfrutar la tradicional calabaza de temporada. Recuperado 19 de septiembre, 2024, de <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/llego-la-hora-de-disfrutar-la-tradicional-calabaza-de-temporada#:~:text=En%20M%C3%A9xico%2C%20anualmente%20se%20consumen,Guerrero%20con%204%20mil%20toneladas>
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). 2020. Betabel, el color de la tierra. Recuperado 20 de marzo, 2023, de <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/betabel-el-color-de-la-tierra?idiom=es#:~:text=En%20M%C3%A9xico%20se%20siembra%20una,m%C3%A1s%20de%20nueve%20mil%20963>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). 2021. Panorama agroalimentario: Consumo anual per cápita. Recuperado 3 de septiembre, 2024, de <https://blogagricultura.com/consumo-anual-nacional/>
- Sharma, A., Mazumdar, B. & Keshav, A. (2020). Formulation, standardization and characterization of novel sattu beverage enriched with beetroot juice. *Journal of Food Science and Technology*, 57, 1936-1943. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-04229-z>
- Silva, E. K., Arruda, H. S., Eberlin, M. N., Pastore, G. M. & Meireles, M. A. A. (2019). Effects of supercritical carbon dioxide and thermal treatment on the inulin chemical stability and functional properties of prebiotic-enriched apple juice. *Food Research International*, 125, 108561. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108561>
- Sinela, A., Rawat, N., Mertz, C., Achir, N., Fulcrand, H. & Dornier, M. (2017). Anthocyanins degradation during storage of *Hibiscus sabdariffa* extract and evolution of its degradation products. *Food Chemistry* 214:234–241. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.07.071>
- Slavin, J. (2013). Fiber and prebiotics: mechanisms and health benefits. *Nutrients*, 5(4), 1417-1435. <https://doi.org/10.3390/nu5041417>
- Soğuksulu, S., & Külçü, D. B. (2023). Determining Some Quality Characteristics of vegan tarhana added with red beet (*Beta vulgaris* var. cruenta) powder. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 66. <https://doi.org/10.1590/1678-4324-2023220844>



- Song, K. Y. & Kim, Y. S. (2019). Effect of mucilage extracted from Basil (*Ocimum basilicum* L.) seeds on physicochemical and rheological properties in low-fat milk protein gel. *Journal of Food Processing and Preservation*, 43(11), e14191. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14191>
- Soria, A. C. & Villamiel, M. (2010). Effect of ultrasound on the technological properties and bioactivity of food: a review. *Trends in Food Science & Technology*, 21(7), 323-331. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2010.04.003>
- Stintzing, F., Herbach, K., Mosshammer, M., Carle, R., Yi, W., Sellappan, S., Akoh, C., Bunch, R. & Felker, P. (2005). Color, betalain pattern, and antioxidant properties of cactus pear (*Opuntia* spp.) clones. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53(2), 442–451. <https://doi.org/10.1021/jf048751y>
- Strack, D., Vogt, T., & Schliemann, W. (2003). Recent advances in betalain research. *Phytochemistry*, 62(3), 247-269. [https://doi.org/10.1016/S0031-9422\(02\)00564-2](https://doi.org/10.1016/S0031-9422(02)00564-2)
- Strieder, M. M., Silva, E. K. & Meireles, M. A. A. (2019). Specific energy: a new approach to ultrasound-assisted extraction of natural colorants. *Probe (Adelaide)*, 23, 30. <http://doi.org/10.5923/j.fph.20190902.02>
- Symons, L. & Brennan, C. (2004). The Effect of barley  $\beta$ -glucan fiber fractions on starch gelatinization and pasting characteristics. *Journal of Food Science*, 69(4), 257-261. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2004.tb06325.x>
- Kaushik (2022), *Red beetroot (Beta vulgaris L.)*, Székely, D. & Máté, M, *Advances in Root Vegetables Research* (336), India: IntechOpen.
- Tabio-García, D., Paraguay-Delgado, F., Sánchez-Madrugal, M. Á., Quintero-Ramos, A., Espinoza-Hicks, J. C., Meléndez-Pizarro, C. O. y Espitia-Rangel, E. (2021). Optimisation of the ultrasound-assisted extraction of betalains and polyphenols from *Amaranthus hypochondriacus* var. Nutrisol. *Ultrasonics Sonochemistry*, 77, 105680. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105680>
- Takács-Hájos, M., & Vargas-Rubóczy, T. (2022). Evaluation of bioactive compounds in leaf and root of five beetroot varieties. *Journal of Agriculture and Food Research*, 7, 100280. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100280>

- Tejada-Ortigoza, V., Garcia-Amezquita, L. E., Serna-Saldívar, S. O. & Welti-Chanes, J. (2016). Advances in the functional characterization and extraction processes of dietary fiber. *Food Engineering Reviews*, 8, 251-271. <https://doi.org/10.1007/s12393-015-9134-y>
- Téllez-Morales, J., Hernández-Santo, B., & Rodríguez-Miranda, J. (2020). Efecto del ultrasonido en las propiedades tecnofuncionales de componentes/ingredientes alimentarios: una revisión. *Ultrasonics Sonochemistry*, 61, 104787. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104787>
- Temelli, F. (1997). Extraction and Functional Properties of Barley  $\beta$ -Glucan as Affected by Temperature and pH. *Journal of Food Science*, 62(6), 1194–1201. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1997.tb12242.x>
- Thaipong, K., Boonprakob, U., Crosby, K., Cisneros-Zevallos, L. y Byrne, D. (2006). Comparison of ABTS, DPPH, FRAP, and ORAC assays for estimating antioxidant activity from guava fruit extracts. *Journal of Food Composition and Analysis*, 19(6-7), 669-675. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2006.01.003>
- Tiwari, B. K., Patras, A., Brunton, N., Cullen, P. J. & O'donnell, C. P. (2010). Effect of ultrasound processing on anthocyanins and color of red grape juice. *Ultrasonics Sonochemistry*, 17(3), 598-604. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2009.10.009>
- Tiwari, B.K., O'Donnell, C.P., Muthukumarappan, K. & Cullen, P.J. (2009). Effect of sonication on orange juice quality parameters during storage. *International Journal of Food Sciences and Technology*, 44, 586-595. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2008.01858.x>
- Tomadoni, B., Cassani, L., Viacava, G., Moreira, M. D. R. & Ponce, A. (2017). Effect of ultrasound and storage time on quality attributes of strawberry juice. *Journal of Food Process Engineering*, 40(5), e12533. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12533>
- Trapani, S., Breschi, C., Cecchi, L., Guerrini, L., Mulinacci, N., Parenti, A., Canuti, V. & Zanoni, B. (2017). Indirect indices of oxidative damage to phenolic compounds for the implementation of olive paste malaxation optimization charts. *Journal of Food Engineering*, 207, 24-34. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.03.012>

- Tresserra-Rimbau, A., Lamuela-Raventos, R. M. & Moreno, J. J. (2018). Polyphenols, food and pharma. Current knowledge and directions for future research. *Biochemical Pharmacology*, 156, 186-195. <https://doi.org/10.1016/j.bcp.2018.07.050>
- Trinidad, T., Wolever, T. y Thompson, L. (1996). Availability of calcium for absorption in the small intestine and colon from diets containing available and unavailable carbohydrates: an in vitro assessment. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 47(1), 83–88. <https://doi.org/10.3109/09637489609028565>
- Türken, T. & Erge, H. S. (2017). Effect of ultrasound on some chemical and microbiological properties of sour cherry juice by response surface methodology. *Food Science and Technology International*, 23(6), 540-549. <https://doi.org/10.1177/108201321770807>
- Tyagi, A., Shabbir, U., Chelliah, R., Daliri, E. B. M., Chen, X., & Oh, D. H. (2021). Limosilactobacillus reuteri fermented brown rice: A product with enhanced bioactive compounds and antioxidant potential. *Antioxidants*, 10(7), 1077. <https://doi.org/10.3390/antiox10071077>
- Upadhyay, S., Tiwari, R., Kumar, S., & Kohli, D. (2017). Production and evaluation of instant herbal mix soup. *International Journal of Agricultural Science and Research*, 7(3), 37-42. Recuperado de [https://www.researchgate.net/profile/Deepika\\_Kohli2/publication/327060056\\_PRODUCTION\\_AND\\_EVALUATION\\_OF\\_INSTANT\\_HERBAL\\_MIX\\_SOUP/links/5b75bec4a6fdcc87df816eca/PRODUCTION-AND-EVALUATION-OF-INSTANT-HERBAL-MIX-SOUP.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Deepika_Kohli2/publication/327060056_PRODUCTION_AND_EVALUATION_OF_INSTANT_HERBAL_MIX_SOUP/links/5b75bec4a6fdcc87df816eca/PRODUCTION-AND-EVALUATION-OF-INSTANT-HERBAL-MIX-SOUP.pdf)
- Valko, M., Leibfritz, D., Moncol, J., Cronin, M. T., Mazur, M. & Telser, J. (2007). Free radicals and antioxidants in normal physiological functions and human disease. *The International Journal of Biochemistry & Cell Biology*, 39(1), 44-84. <https://doi.org/10.1016/j.biocel.2006.07.001>
- Varshney, R., Das, N., Mishra, R., & Roy, P. (2019). Structure-Function Elucidation of Flavonoids by Modern Technologies: Role in Management of Diabetes and Cancer. *In Natural Medicines* (pp. 25-63). CRC Press.
- Vásquez, L., Esmeralda, A., & Hernández, M. (2019). Efectos de los recuentos bacterianos en la contaminación microbiana de la leche de vaca. *Revista Científica de la Facultad de Ciencias Veterinarias*, 29(4), 963-968.

Recuperado de <https://link.gale.com/apps/doc/A624612450/IFME?u=anon~8c83f2e3&sid=googleScholar&xid=d2c0505e>

- Ververidis, F., Trantas, E., Douglas, C., Vollmer, G., Kretzschmar, G., & Panopoulos, N. (2007). Biotechnology of flavonoids and other phenylpropanoid- derived natural products. Part I: Chemical diversity, impacts on plant biology and human health. *Biotechnology Journal: Healthcare Nutrition Technology*, 2(10), 1214-1234. <https://doi.org/10.1002/biot.200700084>
- Vilcanqui-Pérez, F. & Vílchez-Perales, C. (2017). Fibra dietética: nuevas definiciones, propiedades funcionales y beneficios para la salud. Revisión. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 67 (2), 146-156. Recuperado de <http://www.alanrevista.org/ediciones/2017/2/art-10/>
- Villamiel, M. & de Jong, P. (2000). Influence of high-intensity ultrasound and heat treatment in continuous flow on fat, proteins, and native enzymes of milk. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 48(2), 472-478. <https://doi.org/10.1021/jf990181s>
- Villanueva-Flores, R. (2019). Fibra dietaria: una alternativa para la alimentación. *Ingeniería industrial*, (37), 229-242. <https://doi.org/10.26439/ing.ind2019.n037.4550>
- Vivek, K., Mishra, S. & Pradhan, R. C. (2018). Physicochemical characterization and mass modelling of Sohiong (*Prunus nepalensis* L.) fruit. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 12, 923-936. <https://doi.org/10.1007/s11694-017-9708-x>
- Wang, J., Wang, J., Ye, J., Vanga, S. K. & Raghavan, V. (2019). Influence of high-intensity ultrasound on bioactive compounds of strawberry juice: Profiles of ascorbic acid, phenolics, antioxidant activity and microstructure. *Food Control*, 96, 128-136. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2018.09.007>
- Wang, MS, Fan, M., Zheng, AR, Wei, CK, Liu, DH, Thaku, K. y Wei, ZJ (2023). Caracterización de un producto lácteo fermentado, crema agria: lipólisis y perfil de liberación de compuestos de sabor. *Química Alimentaria*, 423, 136299. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.136299>
- Wang, Y., Li, Y., Liu, Y., Chen, X. & Wei, X. (2015). Extraction, characterization and antioxidant activities of Se-enriched tea

- polysaccharides. *International Journal of Biological Macromolecules*, 77, 76-84. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2015.02.052>
- Xu, B., Feng, M., Chitrakar, B., Cheng, J., Wei, B., Wang, B. & Ma, H. (2023). Multi-frequency power thermosonication treatments of clear strawberry juice: Impact on color, bioactive compounds, flavor volatiles, microbial and polyphenol oxidase inactivation. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 84, 103295. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2023.103295>
  - Xu, T., Soto, F., Gao, W., Garcia-Gradilla, V., Li, J., Zhang, X. & Wang, J. (2014). Ultrasound-modulated bubble propulsion of chemically powered microengines. *Journal of the American Chemical Society*, 136(24), 8552-8555. <https://doi.org/10.1021/ja504150e>
  - Ye, L., Zhu, X. & Liu, Y. (2019). Numerical study on dual-frequency ultrasonic enhancing cavitation effect based on bubble dynamic evolution. *Ultrasonics Sonochemistry*, 59, 104744. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104744>
  - Yıkılmış, S., Ozer, H., Levent, O., Çöl, B. G. & Erdal, B. (2022). Effect of thermosonication and thermal treatments on antidiabetic, antihypertensive, mineral elements and *in vitro* bioaccessibility of bioactive compounds in freshly squeezed pomegranate juice. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 16(4), 3023-3041. <https://doi.org/10.1007/s11694-022-01402-5>
  - Zafra-Rojas, Q. Y., Cruz-Cansino, N., Ramírez-Moreno E., Delgado-Olivares, L., Villanueva-Sánchez, J. & Alanis-Garcia, E. (2013). Effects of ultrasound treatment in purple cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) juice. *Ultrasonics Sonochemistry*, 20(5), 1283-1288. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2013.01.021>
  - Zafra-Rojas, Q. Y., Jiménez-Hernández, J. L., Olloqui, E. J., del Socorro Cruz-Cansino, N., Alanís-García, E., Ramírez-Moreno, E., Ariza-Ortega, J.A. & Moreno-Seceña, J. C. (2023). Optimization of thermoultrasound process of soursop (*Annona muricata*) nectar and comparison of its physicochemical properties and *in vitro* bioaccessibility of antioxidants with pasteurized sample. *Food Technology and Biotechnology*, 61(4), 536-548. <https://doi.org/10.17113/ftb.61.04.23.8180>

- Zhang, X., Gao, H., Wang, C., Qayum, A., Mu, Z., Gao, Z. & Jiang, Z. (2018). Characterization and comparison of the structure and antioxidant activity of glycosylated whey peptides from two pathways. *Food Chemistry*, 257, 279-288. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.02.155>
- Zhang, Z., Nie, M., Xiao, Y., Zhu, L., Gao, R., Zhou, C. & Dai, Z. (2021). Positive effects of ultrasound pretreatment on the bioaccessibility and cellular uptake of bioactive compounds from broccoli: Effect on cell wall, cellular matrix and digesta. *Food Science and Technology*, 149, 112052. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112052>
- Zhu, C. P., Zhai, X. C., Li, L. Q., Wu, X. X., & Li, B. (2015). Response surface optimization of ultrasound-assisted polysaccharides extraction from pomegranate peel. *Food Chemistry*, 177, 139-146. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.01.022>
- Zicari, S. M., Zhang, R., & Kaffka, S. (2019). Sugar beet. *Integrated Processing Technologies for Food and Agricultural By-products*, 331–351. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-814138-0.00013-7>