



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



Escola Tècnica Superior  
d'Enginyeria Agronòmica i del Medi Natural

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica  
y del Medio Natural

ESTUDIO DE LA FERMENTACIÓN Y DE DIVERSOS  
PRETRATAMIENTOS TERMOFÍSICOS PARA LA  
MEJORA DE LAS PROPIEDADES ANTIOXIDANTES DE  
PRODUCTOS EN POLVO OBTENIDOS A PARTIR DE  
RESIDUOS DE ZANAHORIA DE IV GAMA

Trabajo Fin de Grado

Grado en Biotecnología

AUTOR/A: Guillén Alonso, Javier

Tutor/a: Seguí Gil, Lucía

Cotutor/a: Barrera Puigdollers, María Cristina

Director/a Experimental: Bas Bellver, Claudia Isabel

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024

## RESUMEN

La obtención de ingredientes vegetales en polvo a partir de residuos de la industria alimentaria ha suscitado un interés creciente en los últimos años. Los procesos de conversión de estos residuos en productos en polvo permiten la valorización integral de sus componentes, posibilitando su reintroducción en la cadena alimentaria como ingredientes funcionales. De este modo, se obtienen productos estables, versátiles y ricos en nutrientes, al tiempo que se da valor a un producto de desecho que supone un problema medioambiental y de gestión para la industria. Además de favorecer la circularidad de los sistemas alimentarios, este enfoque contribuye al desarrollo de dietas más nutritivas y sostenibles.

El proceso de obtención de productos en polvo se basa en tres operaciones unitarias sencillas tales como la desestructuración o triturado, la deshidratación y la molienda final hasta obtener un polvo fino. Sin embargo, existen evidencias científicas de que la aplicación de determinados pretratamientos sobre el material vegetal podría mejorar las características de los productos en polvo obtenidos a partir de este tipo de residuos, debido a los cambios estructurales promovidos. De este modo, el objetivo general del presente trabajo consiste en incorporar diferentes pretratamientos termofísicos y biológicos al proceso de obtención de ingredientes en polvo a partir de residuos de zanahoria.

Concretamente, se propuso estudiar el efecto de distintos pretratamientos biológicos como la fermentación (FERM) o pretratamientos termofísicos como la aplicación de microondas (MW), ultrasonidos (US) o autoclavado (AUTO), sobre las distintas propiedades fisicoquímicas y antioxidantes del residuo de zanahoria generado en una línea de producción de palitos de IV gama, para después poder obtener el polvo de residuo de zanahoria pretratado mediante secado por aire caliente. El trabajo consistió en una primera parte en estudiar el efecto de las variables del pretratamiento con US (tiempo y masa de residuo), MW (potencia y tiempo) y FERM (microorganismo y tiempo) sobre las propiedades fisicoquímicas y antioxidantes del residuo pretratado. El estudio de la fermentación incluyó la evaluación del residuo de zanahoria como sustrato para el crecimiento de distintos microorganismos del género *Lactobacillus* considerados probióticos mediante el recuento de viables y los cambios de pH a distintos tiempos de fermentación. Una vez seleccionadas los niveles de las variables, se procedió a la obtención del polvo mediante triturado del residuo, aplicación de los pretratamientos seleccionados, secado por aire caliente a 60 °C durante 10 h y molienda final. Los polvos obtenidos se evaluaron en cuanto a sus propiedades fisicoquímicas y antioxidantes.

Los resultados obtenidos pusieron de manifiesto que la combinación de los pretratamientos ensayados con los procedimientos de secado y molienda determinan las propiedades del polvo. El estudio inicial de los pretratamientos sobre el residuo de zanahoria triturado permitió la selección de las variables más adecuadas que fueron: en cuanto a la FERM, se seleccionó el microorganismo *Lactobacillus salivarius* spp. *salivarius* durante 24 h; con respecto a la aplicación de US, se seleccionaron 15 min de tratamiento a 40 kHz sobre 100 g de muestra; con respecto al uso de MW, se seleccionó una potencia de 3 W/g durante 4 min; por su parte, el autoclavado consistió en la aplicación de 120 °C durante 5 min. Los resultados obtenidos mostraron cierta mejora en las propiedades antioxidantes y fisicoquímicas de los polvos pretratados mediante fermentación y ultrasonidos, mientras que se evidenció degradación de éstas en el caso de microondas y autoclave.

En términos generales, se concluye que los polvos pretratados obtenidos a partir de residuo de zanahoria son una alternativa interesante para la reincorporación de estos desechos en la cadena alimentaria, así como para la mejora nutricional que suponen los pretratamientos y el secado por aire caliente, otorgándoles aplicaciones interesantes en la elaboración de alimentos y que podrían ser incluidos en distintas matrices alimentarias.

**Palabras clave:** zanahoria, ingredientes funcionales, sistemas alimentarios sostenibles, circularidad, fermentación, microondas, ultrasonidos, pretratamientos, propiedades antioxidantes, lactobacillus, secado

## ABSTRACT

Obtaining powdered vegetable ingredients from food industry waste has garnered increasing interest in recent years. The processes of converting this waste into powdered products allow for the comprehensive valorization of its components, enabling their reintroduction into the food chain as functional ingredients. This results in stable, versatile, and nutrient-rich products while adding value to a waste product that poses environmental and management challenges for the industry. In addition to promoting the circularity of food systems, this approach contributes to the development of more nutritious and sustainable diets.

The process of obtaining powdered products is based on three simple unit operations: deconstruction or grinding, dehydration, and final milling to obtain a fine powder. However, there is scientific evidence that the application of certain pretreatments on plant material could improve the characteristics of the powdered products obtained from this type of waste, due to the structural changes promoted. Therefore, the general objective of this work is to incorporate different thermophysical and biological pretreatments into the process of obtaining powdered ingredients from carrot waste.

Thus, this study aimed to investigate the effect of various biological pretreatment such as fermentation (FERM) or thermophysical pretreatments such as the application of microwaves (MW), ultrasound (US), or autoclaving (AUTO) on the different physicochemical and antioxidant properties of carrot waste generated in a production line of IV range carrot sticks, to later obtain pretreated carrot waste through hot air drying. The work consisted of an initial study of the effect of the pretreatment variables with US (time and mass of residue), MW (power and time), and FERM (microorganism) on the physicochemical and antioxidant properties of the pretreated residue. The fermentation study included the evaluation of carrot waste as a substrate for the growth of different microorganisms of the genus *Lactobacillus* considered probiotics, by counting viable cells and changes in pH at different fermentation times. Once the variable levels were selected, the powder was obtained by grinding the residue, applying the selected pretreatment, drying with hot air at 60 °C for 10 hours, and final milling. The obtained powders were evaluated for their physicochemical and antioxidant properties.

The results showed that the combination of the tested pretreatments with the drying and milling procedures determines the powder's properties. The initial study of the pretreatments on the shredded carrot waste allowed for the selection of the most suitable variables, which were: for FERM, the microorganism *Lactobacillus salivarius* spp. *salivarius* was selected for 24 hours; regarding the application of US, 15 minutes of treatment on 100 g of sample were selected; regarding the use of MW, a power of 3 W/g for 4 minutes was selected; autoclaving consisted of applying 120 °C for 5 minutes. The results showed some improvement in the antioxidant and physicochemical properties of the powders pretreated by fermentation and ultrasound, while degradation of these properties was observed in the case of microwaves and autoclave.

In general terms, it is concluded that the pretreated powders obtained from carrot waste are an interesting alternative for the reintegration of this waste into the food chain, as well as for the nutritional improvement provided by the pretreatments and hot air drying, granting them interesting applications in food preparation and potentially incorporating them into different food matrices.

**Keywords:** carrot, functional ingredients, sustainable food systems, circularity, fermentation, microwaves, ultrasound, pretreatments, antioxidant properties, *Lactobacillus*, drying.

## AGRADECIMIENTOS

Después de la realización de este trabajo, que ha requerido mucho esfuerzo, quisiera dar las gracias a las personas que me han acompañado en este proceso.

Primeramente, me gustaría agradecer a mis tutoras Lucía Seguí Gil y Cristina Barrera Puigdollers por darme la oportunidad de realizar este proyecto, por la atención y la ayuda que me han prestado en todo momento y por todos los conocimientos que me han dado. También tengo que agradecer a Claudia Bas Bellver por toda la ayuda y facilidades que me ha prestado, y por los conocimientos que me ha transmitido.

A mis compañeros y amigos de clase por todos los buenos momentos y experiencias únicas que hemos vivido durante estos 4 años de carrera.

A mis amigos de toda la vida que siempre están y estarán a mi lado para brindarme el apoyo necesario en cada etapa de mi vida.

Y, por último, a mis padres y mi hermano, por nunca dudar de mis capacidades y siempre estar apoyándome incondicionalmente, así como, de haberme inculcado tantos buenos valores que me hacen, hoy en día, ser la persona que soy.

## ÍNDICE GENERAL

<b>1.</b>	<b>INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO.....</b>	<b>1</b>
1.1.	LA ZANAHORIA. PROPIEDADES FUNCIONALES.....	1
1.2.	GENERACIÓN DE RESIDUOS EN LA INDUSTRIA ALIMENTARIA. ....	2
1.3.	OBTENCIÓN DE POLVOS A PARTIR DE RESIDUO DE ZANAHORIA.....	3
1.4.	EFFECTO DE DIFERENTES PRETRATAMIENTOS Y EL SECADO EN LAS PROPIEDADES FUNCIONALES DE LOS POLVOS.....	3
<b>2.</b>	<b>OBJETIVOS Y PLAN DE TRABAJO. ....</b>	<b>6</b>
<b>3.</b>	<b>MATERIAL Y MÉTODOS.....</b>	<b>8</b>
3.1.	MATERIA PRIMA.....	8
3.2.	CEPAS BACTERIANAS Y PREPARACIÓN DEL INÓCULO.....	8
3.3.	ESTUDIO PRELIMINAR DE SECADO POR AIRE CALIENTE. ....	8
3.4.	ESTUDIO DE PRETRATAMIENTOS TERMOFÍSICOS Y BIOLÓGICOS .....	9
3.4.1.	ESTUDIO DE FERMENTACIÓN .....	9
3.4.2.	ESTUDIO DE APLICACIÓN DE ULTRASONIDOS. ....	10
3.4.3.	ESTUDIO DE LA APLICACIÓN DE MICROONDAS.....	11
3.5.	PROCESO DE OBTENCIÓN DE LOS PRODUCTOS EN POLVO.....	12
3.6.	DETERMINACIONES ANALÍTICAS.....	12
3.6.1.	PROPIEDADES ANTIOXIDANTES. .... ¡Error! Marcador no definido.	
3.6.2.	PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS.....	13
3.6.3.	RECUEENTOS MICROBIANOS. .... ¡Error! Marcador no definido.	
3.7.	ANÁLISIS ESTADÍSTICO. ....	16
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>16</b>
4.1.	ESTUDIO PRELIMINAR DE SECADO POR AIRE CALIENTE .....	16
4.2.	EFFECTO DE DIFERENTES PRETRATAMIENTOS BIOLÓGICOS Y TERMOFÍSICOS SOBRE LAS PROPIEDADES DEL RESIDUO DE ZANAHORIA .....	17
4.2.1.	FERMENTACIÓN DEL RESIDUO DE ZANAHORIA CON <i>Lactiplantibacillus plantarum</i> , <i>Limosilactobacillus reuteri</i> y <i>Lactobacillus salivarius</i> . ....	17
4.2.2.	TRATAMIENTO DEL RESIDUO DE ZANAHORIA CON ULTRASONIDOS .....	21

4.2.3.	TRATAMIENTO DEL RESIDUO DE ZANAHORIA CON MICROONDAS.....	23
4.3.	EFFECTO DEL PROCESADO SOBRE LAS PROPIEDADES DE LOS PRODUCTOS EN POLVO .....	25
4.3.1.	EFFECTO SOBRE LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DEL POLVO.....	25
4.3.2.	TAMAÑO DE PARTÍCULA.....	27
4.3.3.	PROPIEDADES ANTIOXIDANTES .....	¡Error! Marcador no definido.
5.	CONCLUSIONES. ....	32
6.	BIBLIOGRAFÍA.....	33

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Actividad del agua ( $a_w$ ) medida sobre residuo triturado sin fermentar y fermentado, a las distintas temperaturas del aire ensayadas. SAC50: muestra secada por aire caliente a 50°C; SAC60: muestra secada por aire caliente a 60°C ; SAC70: muestra secada por aire caliente a 70°C; FSAC50: muestra fermentada secada por aire caliente a 50 °C; FSAC60: muestra fermentada secada por aire caliente a 60 °C; FSAC70: muestra fermentada secada por aire caliente a 70 °C. ....	16
<b>Tabla 2.</b> Propiedades fisicoquímicas del residuo de zanahoria fermentado. ....	18
<b>Tabla 3.</b> Propiedades fisicoquímicas del residuo de zanahoria pretratado por ultrasonidos.....	21
<b>Tabla 4.</b> Propiedades fisicoquímicas del residuo de zanahoria pretratado con microondas. ....	23
<b>Tabla 5.</b> Propiedades fisicoquímicas del residuo de zanahoria y de los polvos de residuo de zanahoria previamente pretratada. ....	25
<b>Tabla 6.</b> Parámetros característicos del tamaño de partícula obtenidos por vía seca y húmeda. Media $\pm$ desviación estándar de cinco y diez repeticiones de vía seca y húmeda, respectivamente. SAC60_SP: secado por aire caliente a 60°C 10 h sin pretratar; SAC60_AUTO: secado por aire caliente a 60°C 10 h de la muestra pretratada por autoclave; SAC60_US: secado por aire caliente a 60°C 10 h de la muestra pretratada por ultrasonidos; SAC60_MW4': secado por aire caliente a 60°C 10 h de la muestra pretratada por microondas durante 4 min. SAC60_MW6': secado por aire caliente a 60°C 10 h de la muestra pretratada por microondas durante 6 min. FSAC60_24: secado por aire caliente a 60°C 10 h de la muestra fermentada 24 h.....	28

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Producción de zanahoria en millones de toneladas y área cultivada en miles de hectáreas en el mundo. (Šeregelj et al., 2021).....	1
<b>Figura 2.</b> Diagrama de flujo correspondiente al estudio preliminar de secado por aire caliente del residuo de zanahoria triturado fermentado y sin fermentar. ....	9
<b>Figura 3.</b> Diagrama de flujo correspondiente al estudio de fermentación del residuo de zanahoria con cada uno de los microorganismos ensayados. ....	10
<b>Figura 4.</b> Esquema del experimental correspondiente al estudio de la aplicación de diferentes frecuencias de ultrasonidos y tiempos de exposición al residuo de zanahoria.....	11
<b>Figura 5.</b> Esquema del experimental correspondiente al estudio de la aplicación de diferentes potencias de microondas y tiempos de exposición al residuo de zanahoria.....	11
<b>Figura 6.</b> Diagrama de flujo del proceso de transformación del residuo de zanahoria fresca sometida a diferentes pretratamientos termofísicos (AUTO, US y MW) o biológicos (F) en los diferentes productos en polvo mediante el secado por aire caliente a 60 °C (SAC). ....	12
<b>Figura 7.</b> Concentración de <i>Lactobacillus salivarius</i> spp., <i>Limosilactobacillus reuteri</i> y <i>Lactiplantibacillus plantarum</i> en el residuo de zanahoria fresca tras 12, 24 o 48 h de incubación y	

evolución del pH durante esos tiempos. Logaritmo de unidades formadoras de colonias (UFC) por gramo de producto. <sup>a,b,c</sup>...letras diferentes en el mismo color identificativo indican diferencias estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95%. ..... 18

**Figura 8.** Evolución de las propiedades antioxidantes del residuo de zanahoria durante la fermentación con *L. salivarius* spp. *salivarius*. A) Contenido de fenoles totales en mg de ácido gálico equivalentes (EAG) por g de materia seca. B) Contenido de flavonoides totales en mg de quercetina equivalentes (EQ) por g de materia seca. C) Capacidad antioxidante medida por el método DPPH expresada en mg de trólox equivalentes (ET) por g de materia seca. D) Capacidad antioxidante medida por el método ABTS expresada en mg de trólox equivalentes (ET) por g de materia seca. F\_12: Residuo de zanahoria fermentado durante 12 h; F\_24: residuo de zanahoria fermentado durante 24 h; F\_48: residuo de zanahoria fermentado durante 48 h; F\_C: muestra control (residuo de zanahoria sin inocular). ..... ¡Error! Marcador no definido.

**Figura 9.** A) Contenido de fenoles totales expresados en mg de ácido gálico equivalentes (EAG) por g de materia seca. B) Contenido de flavonoides totales expresados en mg de quercetina equivalentes (EQ) por g de materia seca. C) Capacidad antioxidante medida por el método DPPH expresada en mg de trólox equivalentes (ET) por g de materia seca. D) Capacidad antioxidante medida por el método ABTS expresada en mg de trólox equivalentes (ET) por g de materia seca. US100\_5: 100 g de muestra expuesta durante 5 min a ultrasonidos; US100\_10: 100 g de muestra expuesta durante 10 min a ultrasonidos; 100 g de muestra expuesta durante 15 min a ultrasonidos; US200\_5: 200 g de muestra expuesta durante 5 min a ultrasonidos; US200\_10: 200 g de muestra expuesta durante 10 min a ultrasonidos; US200\_15: 200 g de muestra expuesta durante 15 min a ultrasonidos; US\_C: muestra control. .... ¡Error! Marcador no definido.

**Figura 10.** A) Contenido de fenoles totales expresados en mg de ácido gálico equivalentes (EAG) por g de materia seca en las muestras pretratadas con microondas. B) Contenido de flavonoides totales expresados en mg de quercetina equivalentes (EQ) por g de materia seca en las muestras pretratadas. C) Capacidad antioxidante medida por el método DPPH expresada en mg de trólox equivalentes (ET) por g de materia seca en las muestras pretratadas. D) Capacidad antioxidante medida por el método ABTS expresada en mg de trólox equivalentes (ET) por g de materia seca en las muestras pretratadas. MW300\_2: muestra expuesta durante 2 min a una potencia de 300 W de microondas; MW300\_4: muestra expuesta durante 4 min a una potencia de 300 W de microondas; MW300\_6: muestra expuesta durante 6 min a una potencia de 300 W de microondas; MW600\_2: muestra expuesta durante 2 min a una potencia de 600 W de microondas; MW600\_4: muestra expuesta durante 4 min a una potencia de 300 W; MW600\_6: muestra expuesta durante 6 min a una potencia de 300 W; MW\_C: muestra control. .... ¡Error! Marcador no definido.

**Figura 11.** Distribución del tamaño de partícula (D [4,3]). A) Vía seca. B) Vía húmeda. SAC60\_SP: secado por aire caliente a 60°C 10 h sin pretratar; SAC60\_AUTO: secado por aire caliente a 60°C 10 h de la muestra pretratada por autoclave; SAC60\_US: secado por aire caliente a 60°C 10 h de la muestra pretratada por ultrasonidos; SAC60\_MW4': secado por aire caliente a 60°C 10 h de la muestra pretratada por microondas durante 4 min. SAC60\_MW6': secado por aire caliente a 60°C 10 h de la muestra pretratada por microondas durante 6 min. FSAC60\_24: secado por aire caliente a 60°C 10 h de la muestra fermentada 24 h. .... 27

**Figura 12.** A) Contenido de fenoles totales expresados en mg de ácido gálico equivalentes (EAG) por g de materia seca del residuo de zanahoria pretratado antes y después de secar. B) Contenido de flavonoides totales expresados en mg de quercetina equivalentes (EQ) por g de materia seca del residuo de zanahoria antes y después de secar. C) Capacidad antioxidante medida por el método DPPH expresada en mg de trólox equivalentes (ET) por g de materia seca del residuo de zanahoria



pretratado antes y después de secar. D) Capacidad antioxidante medida por el método ABTS expresada en mg de trólox equivalentes (ET) por g de materia seca del residuo de zanahoria pretratado antes y después de secar. SP: muestra control; AUTO: residuo de zanahoria pretratado por autoclave; US: residuo de zanahoria pretratado por ultrasonidos; F\_24: residuo de zanahoria fermentado; MW: residuo de zanahoria pretratado por microondas. SAC: secado por aire caliente a 60°C; NO SAC: residuo de zanahoria sin secar.....**Error! Marcador no definido.**



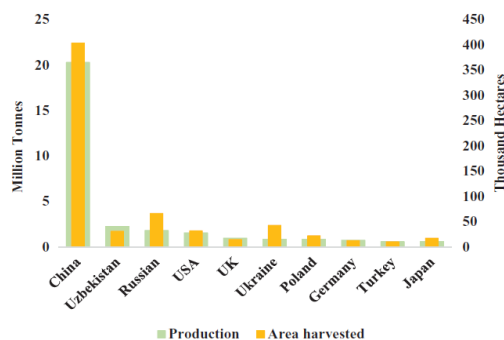
# 1. INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

## 1.1. LA ZANAHORIA. PROPIEDADES FUNCIONALES

La zanahoria (*Daucus carota L*) es uno de los tubérculos más populares en el mundo y es la fuente más importante de carotenoides en dietas en países de occidente (Block, 1994; Torronen et al., 1996). Es uno de los 10 cultivos más valorados económicamente en el mundo (Char, 2018) y se consumen tanto frescas como procesadas en forma de zumos, bebidas, dulces, enlatadas y deshidratadas. Las zanahorias varían mucho en cuanto a tamaño, forma y color, existiendo variedades naranjas, moradas, rojas, blancas y amarillas (Kamiloglu et al., 2016). A su vez, es una hortaliza rica en otros compuestos bioactivos, tales como carbohidratos y minerales (Gopalan et al., 1991), y presenta niveles apreciables de otros componentes funcionales con propiedades muy importantes para la salud, como son flavonoides, poliacetilenos y vitaminas (Singh et al., 2021). Pertenece a la familia *Umbrelliferae* o *Apiaceae*. Es la 16º familia más grande que comprende 455 géneros y más de 3700 especies. A esta familia pertenecen también el apio (*Apium graveolens L.*), el perejil (*Petroselinum crispum*) y la chirivía (*Pastinaca sativa L.*) (Baranski, 2008).

Probablemente, la planta sea originaria de Persia y fue inicialmente cultivada por sus semillas y hojas. Aunque la parte de la planta que se consume más habitualmente es la raíz, ocasionalmente también se consumen las hojas verdes. A mediados del siglo XV el cultivo de zanahorias se expandió hacia el norte y el centro de Asia, el norte de África, Europa y China. En el siglo XVIII, las zanahorias naranjas predominaban en los Países Bajos, las zanahorias blancas en Europa y las variedades rojas en China (Arscott & Tanumihardjo, 2010). Las zanahorias se utilizaron por primera vez con fines médicos y poco a poco se fueron adoptando como alimento (Simon, 2000). Las zanahorias cultivadas se agrupan en 2 grupos principales: la zanahoria occidental o carotena (*Daucus carota ssp. Sativus var. Sativus*) y la zanahoria oriental o antociana (*Daucus carota ssp. Sativus var. Atrorubens Alef.*).

Recientemente, el consumo de zanahoria y sus productos derivados ha experimentado un gran crecimiento debido al reconocimiento como una fuente natural de antioxidantes como son los carotenoides y las antocianinas, sumado a la actividad anticancerígena del  $\beta$ -caroteno, que es un precursor de la vitamina A (Dreosti 1993; Speizer et al. 1999). Consecuentemente, la producción de zanahoria ha crecido considerablemente durante los últimos 10 años. Según la Organización para la Agricultura y la Alimentación (FAO), su cultivo ocupa una superficie de 1,15 millones de hectáreas que producen alrededor de 43 millones de toneladas. El principal país productor es China, con más de 20 millones de toneladas. Le siguen Uzbekistán, Rusia y Estados Unidos, con 1,5 millones de toneladas cada uno, y Reino Unido, Ucrania y Polonia, con cerca de un millón (Šeregelj et al., 2021) como se muestra en la **Figura 1**.



**Figura 1.** Producción de zanahoria en millones de toneladas y área cultivada en miles de hectáreas en el mundo. (Šeregelj et al., 2021)

Como ya se ha comentado, las zanahorias son muy ricas en carotenoides, que son antioxidantes, como el  $\beta$ -caroteno cuya estructura consta de 11 dobles enlaces conjugados y un  $\beta$ -anillo en cada extremo de la cadena y que suministra provitamina A (Tapiero et al., 2004). Contienen otros carotenoides con propiedades antioxidantes como son  $\alpha$ -caroteno, licopeno, luteína y zeaxantina (Char, 2018). Estos son los responsables de brindar el color naranja (gran cantidad de  $\alpha$ -caroteno y  $\beta$ -caroteno), rojo (gran cantidad de licopeno) y amarillo (gran cantidad de luteína) a las zanahorias (Ergun & Süslüoğlu, 2018). En cuanto a las antocianinas, les otorgan el color morado. Estos pigmentos fotosintéticos se acumulan en las raíces debido a un defecto fotosensible que permite que las vías metabólicas de carotenoides y antocianinas se expresen en la oscuridad (Iorizzo et al., 2016).

El contenido de humedad de la zanahoria oscila entre el 86-89%. Otros componentes mayoritarios son los carbohidratos, entre los que se encuentran los azúcares simples fructosa, glucosa y sacarosa, pequeñas cantidades de almidón, y fibra (Alasalvar et al., 2001; Yusuf et al., 2021), siendo su contenido en fibra dietética elevado. La fibra bruta que se encuentra en las raíces proviene principalmente de la celulosa, variando del 35 al 48%, mientras que la hemicelulosa y la lignina se detectan en cantidades más bajas (Sharma et al., 2012). En cuanto a componentes minoritarios, se han encontrado cantidades muy pequeñas de ácido succínico, ácido  $\alpha$ -cetoglutárico, ácido láctico y ácido glicólico, así como cantidades muy pequeñas de nitrato y nitrito, mientras que se ha encontrado cantidades apreciables de tiamina, riboflavina, niacina, ácido fólico y vitamina C (Miedzobrodzka et al., 1992). Destaca también su contenido de minerales como el calcio, fósforo, potasio, magnesio, manganeso, hierro, sodio, cobre y zinc.

## 1.2. GENERACIÓN DE RESIDUOS EN LA INDUSTRIA ALIMENTARIA

La industria alimentaria genera grandes volúmenes de residuos sólidos y líquidos provenientes de la industrialización de frutas y hortalizas, de los que en torno a un 10-60% se producen durante la producción, empaquetado, procesado y consumo final (Omre & Singh, 2018). Estos residuos incluyen hojas, cáscaras, pulpa, semillas, frutos descartados y huesos (de los Ángeles Fernández, 2018; Amaya-Cruz, 2015). Se trata de residuos que pueden causar problemas medioambientales ya que contienen un gran contenido de agua y materia orgánica, como proteínas, carbohidratos (polisacáridos como almidón, celulosa y pectina) y lípidos, lo cual da lugar a una fácil descomposición de la materia produciendo así, malos olores y convirtiendo estos desechos en un ambiente propicio para la proliferación de cucarachas, moscas, mosquitos, ratones y otras plagas y vectores (Nasrin & Matin, 2017). Estas corrientes generalmente tienen un valor económico bajo, menor que el coste de recogida y recuperación para su reutilización, por lo que son descartados, representando una pérdida de biomasa y nutrientes valiosos (Shrivastva & Sanjeev, 2005). Los residuos o descartes, al igual que las hortalizas y frutas de las que provienen, contienen compuestos bioactivos que ofrecen beneficios para la salud y protección frente a enfermedades, especialmente las no transmisibles como las asociadas a la obesidad y el síndrome metabólico, o el cáncer. Estos compuestos pueden tener una segunda oportunidad en industrias tales como la industria alimentaria, biotecnológica y farmacéutica, entre otras (Coman et al., 2020). En la industria alimentaria, también puede sugerirse su empleo como colorantes o saborizantes naturales, indicadores o enzimas (‘Aqilah et al., 2023).

El enfoque de sostenibilidad y circularidad para nuevos diseños alimentarios tiene como meta minimizar el desperdicio de alimentos y, por otro lado, otorgarles un valor añadido de modo que puedan ser reintroducidos en la cadena alimentaria. Según la FAO, un 14% de los alimentos, con un valor aproximado de 400 millones de dólares, se pierde entre la cosecha y la distribución (SOFA, 2019). Las frutas y hortalizas se encuentran entre los alimentos que más contribuyen al desperdicio alimentario y, por lo tanto, a la pérdida de nutrientes. Aproximadamente 1300 millones de toneladas de residuos se pierden o se desperdician en todo el mundo cada año y esta cifra va en aumento (Du et al., 2018). Por otra parte, el auge de los alimentos “convenientes”, es decir, listos para llevar o fáciles de preparar antes de ser consumidos, como son los productos de IV gama, ha provocado un aumento en la generación de desperdicios alimentarios característica de los productos mínimamente procesados. Conviene destacar que, aunque esto puede considerarse un punto negativo, la generación de estos residuos en industria y no en los hogares o restauración concentra su producción y brinda

una oportunidad para valorizarlos. Esta fue la base de estudios de investigación previos (Bas-Bellver et al., 2023b; Bas-Bellver et al., 2020) en la que se obtuvieron productos en polvo a partir de desechos vegetales generados en el procesado en cooperativa, es decir, producción de bandejas y IV gama.

Por tanto, utilizar los residuos generados a partir de frutas y hortalizas para poder dar lugar a compuestos de alto valor añadido, se ha convertido en un punto focal. Esta práctica contribuye a la economía circular en la industria alimentaria que trata de sustituir a la economía lineal, lo que implica aprovechar los residuos generados en el sistema alimentario de modo que puedan ser considerados nuevas materias primas, proponiendo un diseño de nuevos materiales, productos, sistemas y modelos de negocio (Hobson, 2016; Niero et. al, 2017). Así, se espera que se pueda adoptar un patrón de consumo y producción sostenible que se alinee con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) ('Aqilah et al., 2023), principalmente el ODS12 "Producción y consumo responsables" y, en el caso de la valorización para obtener ingredientes nutritivos que puedan contribuir al desarrollo de dietas más saludables y sostenibles, el ODS3 "Salud y bienestar".

En cuanto a la producción de residuos a partir de zanahoria, los desechos se generan después de su cosecha si no tiene las condiciones de calidad adecuadas en cuanto a tamaño y forma. Estos desechos, junto con los generados tras el procesado industrial, suponen hasta el 50% de la producción total, que tradicionalmente se ha utilizado para la alimentación animal y como fertilizantes, o se ha desechado en vertederos (Šeregelj et al., 2021). En los últimos años ha incrementado el interés por los compuestos bioactivos característicos de la zanahoria debido a sus beneficios para la salud. Estudios han demostrado que estos compuestos poseen una importante actividad antioxidante relacionada con la prevención y el tratamiento de diversas enfermedades como las cardiovasculares, el cáncer, la diabetes, las enfermedades gastrointestinales y oculares, entre otras (Al-Snafi, 2017). Existen diversas tecnologías que pueden utilizarse en la valorización de estos residuos permitiendo reducir los impactos negativos del desperdicio, como son transformaciones químicas, físicas, biológicas, aplicadas solas o en combinación, para producir productos funcionales, nuevos alimentos, extractos químicos, biocombustibles o ingredientes en polvo, entre otros (Sharma et al., 2017).

### 1.3. OBTENCIÓN DE POLVOS A PARTIR DE RESIDUO DE ZANAHORIA

Los residuos de frutas y verduras frescas, con contenidos de humedad superiores al 80%, se clasifican como productos altamente perecederos y tienen una vida útil muy corta. Se degradan fácilmente y, por ello, se requiere el tratamiento previo de los residuos para mejorar su durabilidad y lograr un mejor aprovechamiento, ayudando a preservar los compuestos bioactivos (Bas-Bellver et al., 2020).

En estudios anteriores (Bas-Bellver et al., 2023a; Bas-Bellver et al., 2020) se ha propuesto la valorización integral de los residuos de hortalizas generados en las primeras etapas de transformación a través de un proceso de obtención de ingredientes funcionales en polvo, empleando operaciones sencillas y fáciles de escalar que generalmente incluyen una disrupción previa o triturado, una deshidratación y una molienda final para obtener un polvo fino. Tradicionalmente, las técnicas de deshidratación de frutas y verduras han sido el secado al sol, lo cual implica tiempos largos de proceso, o por aire caliente, siendo esta última la tecnología más ampliamente utilizada en la industria alimentaria. Otras técnicas tales como la liofilización, el secado al vacío, la deshidratación osmótica, el secado asistido por microondas o combinado, también han sido objeto de investigación (Karam et al., 2016). En la industria, los productos en polvo se obtienen a partir de estas técnicas, combinadas con una etapa de molienda, y se pueden considerar como productos finales (azúcar, sal, café, especias, leche en polvo...) o también como productos intermedios (Murrieta-Pazos et al., 2012). Los productos transformados en polvo brindan muchos beneficios y ventajas económicas debido a la reducción de su volumen y peso, lo que facilita su envasado, manipulación y transporte. Además, presentan un valor nutricional mejorado y una mayor bioaccesibilidad de los nutrientes (Gao et al., 2020).

Así pues, la transformación de residuos en ingredientes en polvo consigue el aprovechamiento integral de un material considerado de desecho, y su conversión en un alimento o ingrediente funcional. Estos polvos se presentan de forma concentrada y versátil. Los ingredientes en polvo de residuos vegetales tendrían diferentes aplicaciones como colorantes, saborizantes o conservantes o

para aumentar el valor nutricional de los alimentos, fomentando el desarrollo de dietas nutritivas y seguras con un menor impacto medioambiental.

La investigación llevada a cabo en este trabajo surge a raíz del proyecto: “Obtención de Polvos de Uso Alimentario con Propiedades Funcionales a Partir de Residuos de las Líneas de Confección de Hortalizas” (RESHORTPOLLS), financiado por la Generalitat Valenciana a través de la Agencia Valenciana de Fomento y Garantía Agraria y en el contexto del Programa 2014-2020 de la C. Valenciana, financiado por el Fondo Europeo Agrario de Desarrollo Rural, el cual fue desarrollado en cooperación con la Cooperativa Agrícola de Villena (Agrícola Villena, Coop. V). En este proyecto se desarrollaron los procesos de valorización integral de los residuos de confección de hortalizas en cooperativa (col repollo, ajo puerro, apio, zanahoria, brócoli) para obtener ingredientes funcionales en polvo. El presente estudio se enmarca en el proyecto “Pretratamientos termofísicos y biológicos para la mejora de la funcionalidad de productos en polvo obtenidos a partir de residuos de hortalizas, y valoración de su aplicación en el sector agroalimentario (PAID-10-23, UPV).

#### 1.4. EFECTO DE DIFERENTES PRETRATAMIENTOS Y EL SECADO EN LAS PROPIEDADES FUNCIONALES DE LOS POLVOS

Tal y como se ha descrito previamente, el proceso de obtención de polvos a partir de frutas y hortalizas consta de pretratamientos, como el lavado y la desestructuración, una etapa de deshidratación, y una molienda final, que determinarán sus propiedades funcionales y tecnológicas (Ramírez-Pulido et al., 2021). Tanto el secado como la molienda o disrupción previa al secado son interdependientes (Djantou et al., 2011): la reducción de tamaño antes del secado modifica el comportamiento durante el secado y el secado genera una estructura determinada que va a influir en la molienda final.

El secado es uno de los métodos de conservación de alimentos más comunes. Es un proceso complejo que implica la transferencia simultánea de calor y materia requiriendo un control adecuado del proceso (Mujumdar & Passos, 2000). El calor latente de vaporización puede ser suministrado por convección, conducción y radiación, o mediante campos electromagnéticos o radiofrecuencia (Mujumdar, 2007). El secado convencional, conocido como secado por aire caliente o por convección, es la técnica más empleada para el tratamiento de subproductos (Krokida et al., 2002; Doymaz et al., 2004; Ruiz-Celma et al., 2008). Este tipo de secado suele implicar elevados costes energéticos, y seleccionar de manera adecuada las condiciones de secado será un requisito primordial para asegurar la calidad de los productos y el bajo impacto ambiental (Liébanes et al., 2008; Vega-Gálvez et al., 2010). Mediante esta técnica se elimina la suficiente cantidad de agua como para reducir la actividad del agua ( $a_w$ ) a un nivel en el que el crecimiento microbiano se ve inhibido y se reduce la tasa de reacciones de deterioro, enzimáticas y no enzimáticas. El secado por aire caliente presenta muchas ventajas desde el punto de vista operacional, ya que es de fácil manejo, el coste es relativamente bajo y es fácil de escalar, además de presentar un rendimiento elevado. En cambio, también presenta importantes desventajas como son la baja eficiencia energética y el largo tiempo de secado que tiene lugar durante el período de velocidad de secado decreciente, debido a la rápida reducción de humedad de la superficie y la consiguiente contracción, lo cual da lugar a una reducción de la transferencia de agua a través del producto y, consecuentemente, un aumento de la temperatura del producto (Feng & Tang, 1998). Es importante resaltar que la temperatura de secado al aire es uno de los factores más importantes que condicionan la calidad del producto final (Larrauri et al., 1997; Gupta et al., 2011; Chen & Martynenko, 2013) y que, aunque las altas temperaturas de secado (60-80 °C) dan lugar a un aumento significativo de la velocidad de secado, también pueden provocar degradaciones de calidad indeseables (Karim & Hawlader, 2005; Vega-Gálvez et al., 2009; Seiedlou et al., 2010; Russo et al., 2013). Además, las altas temperaturas también pueden producir cambios en las propiedades ópticas del producto debido a las reacciones de pardeamiento o reacciones de Maillard.

Por último, la molienda posterior del producto seco juega un papel muy importante porque va a reducir el tamaño de partícula de los polvos obtenidos y esto es esencial en el uso posterior que se le vaya a dar. Esta reducción del tamaño de las partículas se logra mediante la aplicación de fuerzas

mecánicas externas (Jung et al., 2018) que actúan sobre un material suficientemente grande como para romper la unión molecular interna generando tensión en la estructura del alimento. Se puede realizar mediante distintos equipos como trituradoras, molinos, desintegradores, cortadores, picadoras y homogeneizadores (Wu et al., 2007). El contenido de humedad que contenga el producto antes de la molienda será un factor clave a la hora de obtener el producto final ya que unos niveles diferentes de humedad podrían mostrar diferentes propiedades del polvo en cuanto a la forma de las partículas, la distribución del tamaño de las partículas y la fluidez (Kamdem & Hardy, 1995).

En cuanto a los pretratamientos, en los últimos años existe una tendencia por desarrollar o recuperar tecnologías no térmicas para la conservación de los alimentos, debido a que las tecnologías térmicas pueden dar lugar a pérdidas de nutrientes. Estas nuevas tecnologías pueden mejorar la calidad y la vida útil de las frutas y verduras y son una alternativa con mucho potencial frente a los métodos térmicos convencionales (Rupasinghe & Yu, 2012). Entre estos pretratamientos, se encuentran algunas transformaciones biológicas, como la **fermentación (F)**, y pretratamientos termofísicos como, por ejemplo, el **autoclavado (AUTO)**, la aplicación de **ultrasonidos (US)** o de **microondas (MW)**.

En primer lugar, como método de conservación destaca la **fermentación (F)**. La fermentación es una tecnología tradicional y económica, que requiere poca energía para conservar los alimentos en comparación con otros procedimientos de conservación. A su vez, la fermentación permite enriquecer los alimentos con compuestos bioactivos, que se habrán liberado o transformado en formas más activas gracias al metabolismo microbiano, y también permite mejorar las propiedades organolépticas, la digestibilidad y la bioaccesibilidad y posterior asimilación de nutrientes y compuestos bioactivos (Samtiya et al., 2021). La acción que los microorganismos ejercen sobre el tejido vegetal afecta el contenido y biodisponibilidad de muchos componentes vegetales, como los macronutrientes, y compuestos que se presentan en menor concentración como son los polifenoles y las vitaminas. Por otro lado, la fermentación con microorganismos probióticos añade el beneficio que aportan los propios microorganismos sobre la salud intestinal del consumidor. Los probióticos se definen como bacterias de las especies, normalmente *Lactobacillus* o *Bifidobacterium*, que se encuentran en la microbiota intestinal y, por ende, pueden sobrevivir en él (Vesterlund et al., 2012) beneficiando al huésped cuando se administran en cantidades adecuadas debido a la mejora del equilibrio intestinal (Tamang, 2009), además de otros beneficios para la salud como puede ser la protección de la barrera epitelial, o mejora de la respuesta inmune (Cerezuela et al., 2012; Hiremath & Pragasam, 2022). Conviene destacar que los alimentos probióticos desarrollados a partir de matrices vegetales están experimentando un crecimiento en el mercado de alimentos funcionales, tradicionalmente basado en los productos lácteos (Aspri et al., 2020). Debido a la reciente concienciación de la población sobre la reducción del consumo de productos derivados de animales, y la relación entre la alimentación y su relación con la salud, el consumo de alimentos probióticos no lácteos obtenidos a partir de frutas y verduras está actualmente en auge (James & Wang, 2019). Hoy en día pueden encontrarse probióticos en productos tales como cereales, snacks, zumos de frutas o suplementos (Rivera-Espinoza & Gallardo-Navarro, 2010). No obstante, incorporar probióticos en nuevas matrices alimentarias, como pueden ser los residuos obtenidos a partir de frutas y hortalizas, y mantenerlas vivas, no es una tarea fácil. Existen diversos factores que pueden afectar a la viabilidad del probiótico en las distintas etapas del proceso, tales como la temperatura, la exposición prolongada al oxígeno, la humedad, el pH y la presencia de otros microorganismos (Vesterlund et al., 2012). En cuanto al impacto beneficioso que tienen sobre la salud, la dosis diaria de ingesta recomendada es de  $10^8$  hasta  $10^9$  UFC. Por este motivo, los probióticos suelen incorporarse en concentraciones de  $10^7$  hasta  $10^8$  UFC por gramo de producto (Crittenden, 2009). Por otra parte, la actividad del agua ( $a_w$ ) del producto final es un factor clave para mantener la viabilidad de los probióticos en los productos secos.

El **autoclavado (AUTO)** es una técnica de tratamiento térmico mecánico, que se ha utilizado para tratar residuos industriales mixtos, así como residuos sólidos urbanos, aplicando alta temperatura (121 °C) y presión (1,8-2,0 bar) durante un período de tiempo determinado. Estas condiciones aplicadas son suficientes para esterilizar los residuos, pero también pueden emplearse para cambiar sus características estructurales, modificando su comportamiento posterior frente al secado y

contribuyendo a liberar compuestos bioactivos de interés debido a la solubilización de membranas y paredes, o a la ruptura de estructuras y enlaces. Algunos autores han reportado que el autoclavado contribuye a extraer sustancias bioactivas de manera más eficiente, ya que utiliza condiciones de presión y temperatura más altas que otros métodos, lo que resulta en un aumento en el rendimiento de la extracción (Park et al., 2014), así como en el contenido de ácidos fenólicos libres del producto final (Laddomada et al., 2015).

Otra metodología que ha sido objeto de muchas investigaciones, pero todavía considerada una tecnología emergente, es la aplicación de ondas **de ultrasonidos (US)**. Los US se han convertido en una tecnología innovadora y atractiva con diversos usos en la industria alimentaria debido a sus efectos en la preservación y el procesado de alimentos (Chemat et al., 2011; Knorr et al., 2004), incluyendo mejoras en la extracción y coeficientes de difusión. Presenta ciertas ventajas como son la inocuidad y seguridad de las ondas sonoras, su sostenibilidad, mejoras en la seguridad microbiana, y el aumento de la vida útil de los alimentos (Kentish & Ashokkumar, 2011). Algunos autores también sugieren que pueden actuar de forma positiva en cuanto a la acumulación de compuestos bioactivos en las plantas (Yu et al., 2016). Los ultrasonidos aplicados a una alta energía y una baja frecuencia (20-100 kHz), son ondas mecánicas que se propagan en un medio mediante la transferencia de energía y no de partículas. La onda de US es una onda longitudinal caracterizada por alternar ciclos de compresión y rarefacción, lo que conlleva a variaciones de la presión en el medio, provocando un posterior colapso. Este fenómeno que engloba los ciclos y el colapso se denomina fenómeno de cavitación (Krautkrämer et al., 2013; Rose et al., 2014), el cual produce la formación de burbujas que colapsan, provocando así cambios en el tejido que dan lugar a distintos sucesos como la aparición de poros en las membranas celulares, la desintegración de células, la desnaturalización de enzimas, la formación de canales microscópicos y la reducción de radicales libres (Chemat et al., 2011; Nowacka & Wedzik, 2016). En la industria alimentaria se ha aprovechado esta tecnología para mejorar las características cualitativas de los alimentos o residuos, garantizar la seguridad de diversos productos alimenticios y minimizar los efectos negativos sobre las características sensoriales de los alimentos (Arvanitoyannis et al., 2017). En el procesado de alimentos, la aplicación de los ultrasonidos se ha propuesto para mejorar diversos procesos tales como extracción, congelación, descongelación, salado, oxidación, filtración y secado/deshidratación, con el fin de aumentar su eficiencia (Tao et al., 2015).

Finalmente, otra de las tecnologías consideradas emergentes dentro del pretratamiento de residuos para su aprovechamiento y valorización son las **microondas (MW)**. La técnica de procesado por microondas utiliza campos electromagnéticos con una frecuencia de 300 MHz a 300 GHz (Regier et al., 2017), las cuales interactúan con el agua y los iones presentes en el producto alimentario, provocando efectos térmicos y efectos no térmicos. El calentamiento por MW supone un coste energético menor y da lugar a un calentamiento volumétrico, dirigido y más rápido debido al contacto directo del alimento con el campo electromagnético generado por el magnetron o generador de microondas (Hoz et al., 2005). Por otra parte, las microondas pueden generar “puntos calientes” con temperaturas mucho más altas, produciendo algunos efectos no deseados, así como un efecto no térmico que rompe los enlaces de hidrógeno en la celulosa debido al movimiento oscilante de los dipolos (Mikulski & Kłosowski, 2020). Aunque los “puntos calientes” o sobrecalentamientos suelen considerarse uno de los efectos no deseados de las MW, estos efectos se tornan interesantes como pretratamiento ya que favorecen fenómenos de disrupción y autoexplosión a nivel local, por lo que son la base del empleo de MW como pretratamiento de residuos lignocelulósicos para la obtención de bioetanol u otros compuestos con valor añadido (Conesa et al., 2016).

En resumen, los pretratamientos propuestos ofrecen oportunidades para mejorar las características funcionales de los residuos de hortalizas, por lo que se plantea su incorporación al proceso de valorización integral de dichos residuos para la obtención de ingredientes funcionales en polvo.



## 2. OBJETIVOS Y PLAN DE TRABAJO

El objetivo principal del presente Trabajo Final de Grado es evaluar el impacto de diferentes pretratamientos termofísicos y biológicos sobre las propiedades fisicoquímicas y antioxidantes de productos en polvo obtenidos a partir de residuo de zanahoria de IV gama.

Para la consecución del objetivo principal se plantearon los siguientes objetivos particulares:

1. Estudiar el residuo de zanahoria como sustrato para el crecimiento de microorganismos ácido-lácticos considerados probióticos, tales como *Lactiplantibacillus plantarum*, *Limosilactobacillus reuteri* y *Lactobacillus salivarius*, y seleccionar el microorganismo que presente mejor adaptación.
2. Estudiar el efecto de diferentes pretratamientos termofísicos (ultrasonidos, microondas, autoclavado) y biológicos (fermentación) sobre las propiedades del residuo de zanahoria.
3. Obtener polvos estables mediante secado por aire caliente y molienda a partir de los residuos pretratados y sin pretratar, y evaluar el impacto de los pretratamientos y el secado sobre las características fisicoquímicas y funcionales de los productos en polvo obtenidos.

Para la consecución del objetivo planteado se estableció el siguiente plan de trabajo:

1. Estudio del secado por aire caliente del residuo de zanahoria fresca y fermentada con *Lactiplantibacillus plantarum* para obtener un producto seco con una  $a_w$  por debajo de 0,3.
2. Estudio del efecto de la fermentación durante 48 h con *Lactiplantibacillus plantarum*, *Lactobacillus salivarius* spp. y *Limosilactobacillus reuteri* sobre las propiedades fisicoquímicas, antioxidantes y microbiológicas del residuo de zanahoria, con el fin de seleccionar la cepa microbiana más adecuada.
3. Evaluación del impacto de distintos pretratamientos termofísicos en las propiedades funcionales del residuo de zanahoria, incluyendo el estudio de las variables de proceso en el caso del pretratamiento por ultrasonidos y microondas.
4. Obtención de polvos a partir del residuo de zanahoria pretratado mediante ultrasonidos (US), microondas (MW), autoclave (AUTO) o pasteurización + fermentación (PAST + FERM) y posterior secado por aire caliente y molienda.
5. Análisis de resultados y discusión del efecto de los distintos tratamientos sobre las propiedades de los productos en polvo obtenidos.

### 3. MATERIAL Y MÉTODOS

#### 3.1. MATERIA PRIMA

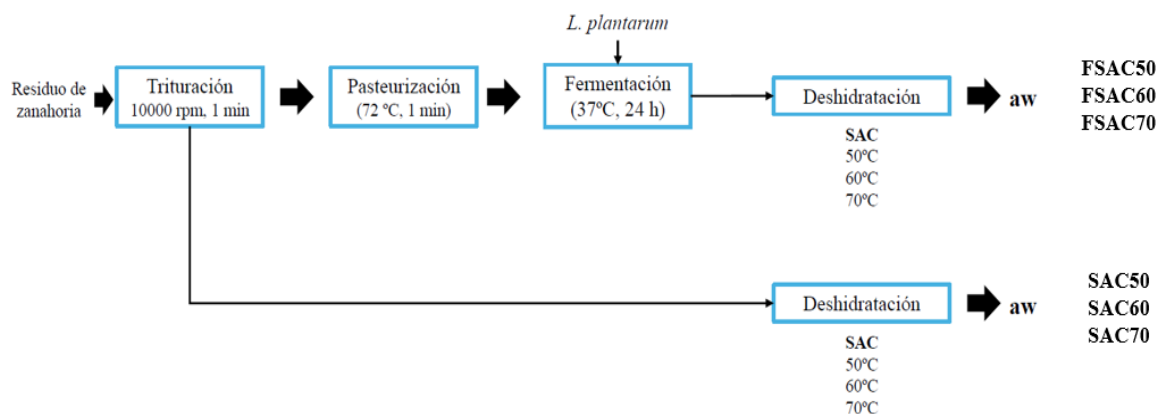
El residuo de zanahoria empleado como materia prima en el presente trabajo procedía de la línea de palitos de zanahoria de IV gama de la cooperativa Agrícola Villena, S.L. (Alicante, España) y consistía en palitos descartados por no cumplir los requisitos de calidad y forma del producto comercializado. El residuo llegó lavado, pelado y cortado en palitos, y se procesó directamente a su llegada o se almacenó en refrigeración durante un máximo de 48 h. Antes de ser utilizado en los experimentos que se describirán a continuación, el residuo de zanahoria se sometió a una etapa de triturado con el fin de obtener un tamaño de partícula de unos 5 mm, en un procesador de alimentos (Thermomix® TM6, Vorwerck®) a 10.000 rpm durante 10 s. Las condiciones de triturado del residuo se escogieron a partir de estudios previos (Bas-Bellver, et al., 2020).

#### 3.2. CEPAS BACTERIANAS Y PREPARACIÓN DEL INÓCULO

Las cepas utilizadas para fermentar el residuo de zanahoria fueron *Lactiplantibacillus plantarum* spp. CECT 749, *Lactobacillus salivarius* spp. CECT 4063 y *Limosilactobacillus reuteri* ssp. CECT 925, todas ellas provenientes de la Colección Española de Cultivos Tipo (CECT, Valencia, España). Para obtener el inóculo bacteriano de cada cepa se partió de crioviales que contenían el líofilo previamente reactivado en caldo Man Rogosa y Sharpe (MRS) (SharlauChemie®, Barcelona, España) conservado a -20 °C. Tras la descongelación a temperatura ambiente y posterior centrifugación durante 1 min a 3000 rpm (MiniSpin Plus Eppendorf), el sobrenadante se retiró y la fase sólida se resuspendió con 1 mL de caldo MRS estéril (SharlauChemie®, Barcelona, España) llevándose finalmente a un volumen total de 50 mL del mismo medio de cultivo. El caldo inoculado se mantuvo a 37 °C durante 24-48 h en una estufa de incubación (PSelecta modelo Incudigit). Pasado este tiempo, se realizaron siembras masivas o en césped en la superficie de placas de Petri con agar MRS estéril (SharlauChemie®, Barcelona, España), que se incubaron a 37 °C durante 24-48 h en estufa (PSelecta modelo Incudigit). Estas placas se conservaron en nevera a 5 °C hasta la preparación del inóculo. Para ello, se recogió la mayor cantidad posible del microorganismo que había crecido en la superficie de una placa de césped utilizando un asa de siembra, y se llevó a un volumen de 50 mL de caldo MRS estéril, el cual, se incubó en estufa (PSelecta modelo Incudigit) a 37 °C durante 24 h. De esta manera, se obtuvo el inóculo inicial con una concentración microbiana del orden de  $10^8$ - $10^9$  ufc/mL. La esterilización del material necesario para desarrollar esta parte del experimental se realizó en autoclave (Systec GmbH, modelo VB-40; Linden, Alemania) a 120 °C durante 2 h.

#### 3.3. ESTUDIO PRELIMINAR DE SECADO POR AIRE CALIENTE

El diseño experimental del estudio preliminar se presenta en la **Figura 2**. Este estudio se llevó a cabo con el objeto de definir el tiempo de secado necesario para alcanzar una actividad del agua inferior a 0,3, y evaluar el efecto de la temperatura del aire de secado sobre la actividad del agua y el recuento de viables del residuo de zanahoria. El residuo se utilizó en dos formas: triturado y fresco, o pasteurizado a 72 °C durante 1 min y fermentado con *Lactiplantibacillus plantarum* durante 24 h a 37 °C. Para el secado, el material vegetal se distribuyó en láminas de 1 cm de espesor, dispuestas sobre las bandejas de un secador de bancada (Gastroback, Narutal Plus 46600, Alemania), donde se sometió a una corriente de aire caliente a 50, 60 ó 70 °C hasta que la actividad del agua ( $a_w$ ) fuera inferior a 0,3. El secado a 50 °C se completó en 14 h para el residuo de zanahoria fresco, mientras que para el fermentado fueron necesarias 12 h; a 60 °C, el secado se completó en 10 h para el residuo fresco y en 7 h para el fermentado; finalmente, a 70 °C, el proceso se completó en 6 h para el residuo fresco y en 5 h para el fermentado.



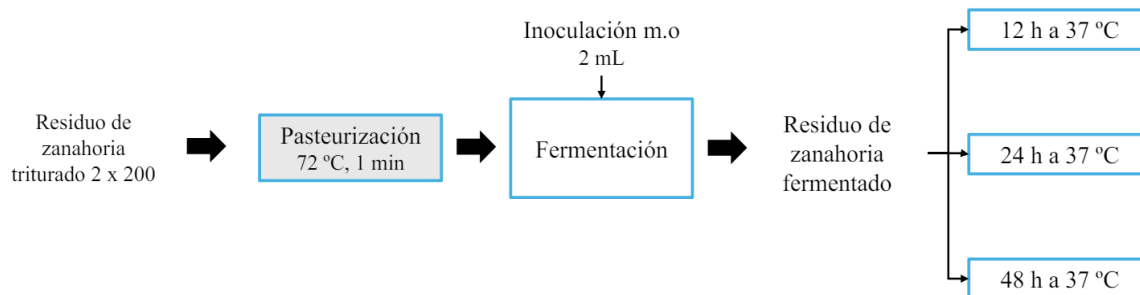
**Figura 2.** Diagrama de flujo correspondiente al diseño experimental del estudio preliminar de secado por aire caliente del residuo de zanahoria triturado fermentado y sin fermentar. FSAC: residuo fermentado y secado por aire caliente; SAC: residuo secado por aire caliente; 50, 60, 70 indica la temperatura de secado en grados centígrados.

### 3.4. ESTUDIO DE PRETRATAMIENTOS TERMOFÍSICOS Y BIOLÓGICOS

En este apartado se describen los estudios llevados a cabo con el fin de definir las condiciones adecuadas de diferentes pretratamientos biológicos (fermentación) y termofísicos (tratamiento con microondas o ultrasonidos) aplicados al residuo de zanahoria teniendo en cuenta, entre otros factores, los cambios ocasionados en su contenido en compuestos de interés.

#### 3.4.1. ESTUDIO DE FERMENTACIÓN

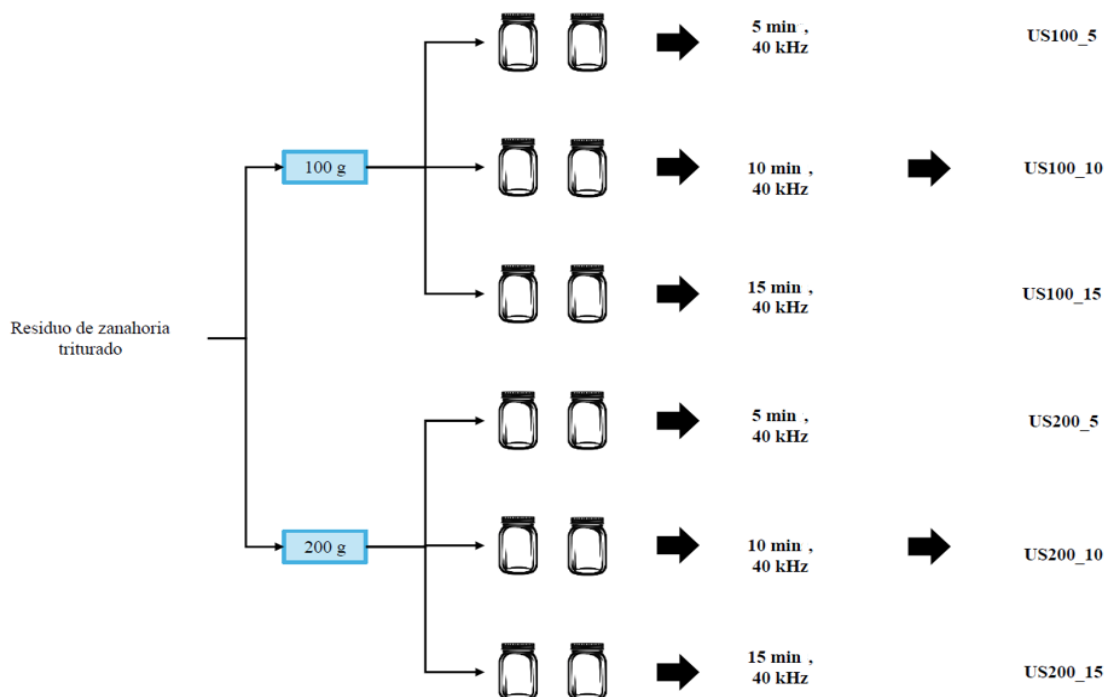
Durante el estudio preliminar (aptdo. 3.3.), surgieron dudas sobre la idoneidad del microorganismo propuesto, lo que llevó a plantear el empleo de otros microorganismos, según se describe a continuación. Para seleccionar la cepa y el tiempo de fermentación que resultan en un residuo de zanahoria con una mayor población microbiana, se fermentó el residuo procedente de un mismo lote los siguientes microorganismos: *Lactiplantibacillus plantarum* spp. CECT 749, *Lactobacillus salivarius* spp. CECT 4063 y *Limosilactobacillus reuteri* ssp. CECT 925. Para minimizar la carga microbiana naturalmente presente en el residuo de zanahoria y favorecer el crecimiento del microorganismo de interés, el residuo se pasteurizó a 72 °C durante 1 min. Este tratamiento térmico se llevó a cabo en frascos estériles de 250 mL conteniendo 200 g de residuo triturado, y sumergidos en un baño termostático a 82 °C hasta que el centro geométrico del frasco alcanzó los 72 °C, manteniendo esta temperatura durante 1 min. A continuación, se enfriaron los frascos a temperatura ambiente y, alcanzados los 40 °C, se inocularon con 2 mL del inóculo inicial, preparado según se describe en el apartado correspondiente. Una vez inoculados, los frascos se introdujeron en estufa de incubación a 37 °C (PSelecta modelo Incudigit). Transcurridas 12, 24 y 48 h desde el inicio de la fermentación, se extrajeron los frascos de la estufa y se midió el pH y se procedió a realizar diluciones seriadas y siembra en placa para determinar el contenido microbiano del residuo contenido fermentado. El diseño experimental de este pretratamiento se muestra en la **Figura 3**. A cada tiempo evaluado se extrajeron 2 frascos de residuo y se midieron el pH y el crecimiento microbiano por triplicado, en cada uno de ellos. Este proceso se repitió para cada uno de los 3 microorganismos objeto de estudio, asegurando la esterilización previa de todo el material en autoclave (Systec GmbH, modelo VB-40; Linden, Alemania) a 120 °C durante 2 h.



**Figura 3.** Diagrama de flujo correspondiente al diseño experimental del estudio de fermentación del residuo de zanahoria con *Lactiplantibacillus plantarum* spp. CECT 749, *Lactobacillus salivarius* spp. CECT 4063 y *Limosilactobacillus reuteri* ssp. CECT 925.

### 3.4.2. ESTUDIO DE APLICACIÓN DE ULTRASONIDOS

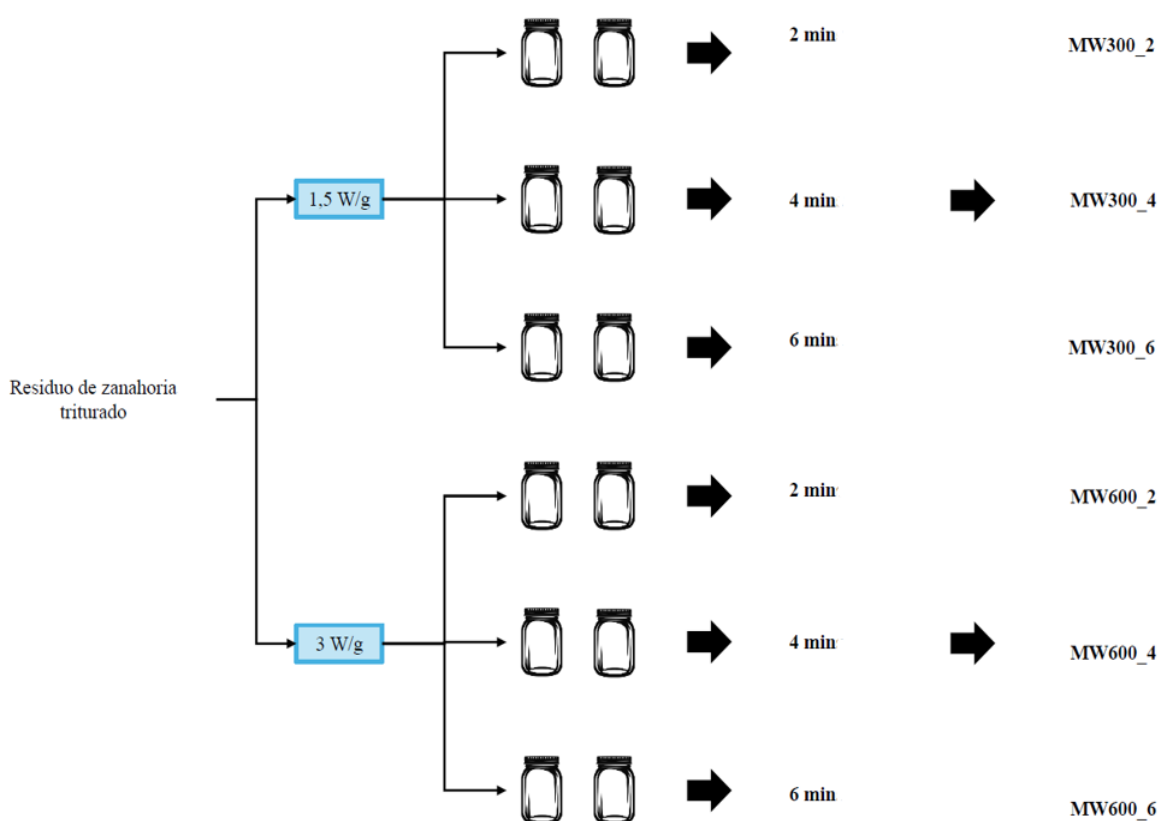
Este estudio se llevó a cabo con el fin de evaluar el efecto de la frecuencia de ultrasonidos aplicada por gramo de muestra y del tiempo de tratamiento, sobre las propiedades fisicoquímicas y antioxidantes del residuo de zanahoria. Para ello se procedió a realizar el experimental propuesto en la **Figura 4**, de modo que se llenaron frascos de vidrio de 250 mL con cierre Twist-Off con 100 ó 200 g del residuo de zanahoria triturado, y se sumergieron en un baño de ultrasonidos Selecta, modelo Ultrasons-H, que opera a una frecuencia fija de 40 kHz, donde permanecieron durante 5, 10 ó 15 min. Pasado este tiempo, el residuo pretratado se caracterizó en términos de propiedades fisicoquímicas (humedad, actividad del agua y contenido en sólidos solubles) y antioxidantes (contenido en fenoles y flavonoides totales y actividad antioxidante por los métodos DPPH y ABTS). Se realizaron dos replicados del tratamiento por ultrasonidos. De cada réplica, se obtuvieron dos extractos cuyas propiedades antioxidantes se analizaron por duplicado. Por otro lado, la caracterización de las propiedades fisicoquímicas se realizó sobre la mezcla del contenido de los dos frascos restantes, por triplicado.



**Figura 4.** Esquema del experimental correspondiente al estudio de la aplicación de diferentes frecuencias de ultrasonidos y tiempos de exposición. US100: 100 g de residuo.; US200: 200 g de residuo.

### 3.4.3. ESTUDIO DE LA APLICACIÓN DE MICROONDAS

Este estudio se llevó a cabo con el objeto de evaluar el efecto de la potencia de microondas aplicada por gramo de muestra y el tiempo de exposición sobre las propiedades fisicoquímicas y antioxidantes del residuo de zanahoria. Para ello, se llenaron frascos de vidrio de 250 mL con cierre Twist-Off con 100 g del residuo de zanahoria triturado y se introdujeron en un horno microondas (Samsung, modelo GW72N), donde se aplicaron potencias de 1,5 y 3 W/g durante 2, 4 y 6 min (**Figura 5**). Una vez finalizado el tratamiento, se extrajeron los frascos del horno microondas y el residuo contenido en su interior se caracterizó en términos de propiedades fisicoquímicas (humedad, actividad del agua y contenido en sólidos solubles) y antioxidantes (contenido en fenoles y flavonoides totales y actividad antioxidante por los métodos DPPH y ABTS). Cada una de las condiciones de procesado se ensayó por duplicado. De cada réplica, se obtuvieron dos extractos cuyas propiedades antioxidantes se analizaron por duplicado. Las propiedades fisicoquímicas se analizaron, por triplicado, sobre el resultado de mezclar el residuo de los dos frascos restantes.

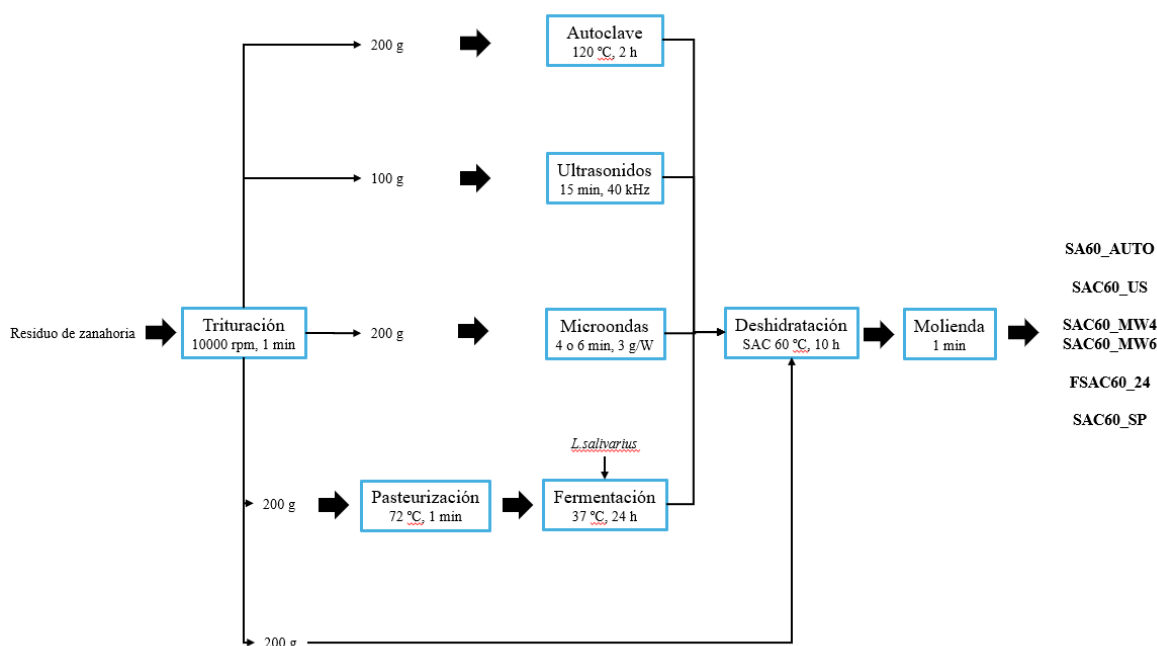


**Figura 5.** Esquema del experimental correspondiente al estudio de la aplicación de diferentes potencias de microondas y tiempos de exposición al residuo de zanahoria.

### 3.5. PROCESO DE OBTENCIÓN DE LOS PRODUCTOS EN POLVO

En este apartado se describe el estudio realizado para evaluar el efecto de diferentes pretratamientos termofísicos o biológicos aplicados al residuo de zanahoria triturado sobre las propiedades fisicoquímicas, antioxidantes y, en su caso, microbianas, de los polvos obtenidos tras el secado con aire a 60 °C durante 10 h y posterior molienda. Los estudios anteriores permitieron seleccionar las variables más prometedoras, para cada uno de los pretratamientos incluidos en los ensayos previos. De este modo, los pretratamientos termofísicos ensayados fueron (Figura 6): autoclavado de 200 g del residuo triturado en un frasco de vidrio de cierre Twist-Off a 120 °C durante 5 min en autoclave (Systec GmbH, modelo VB-40; Linden, Alemania); el tratamiento de 100 g de muestra triturada con ultrasonidos a 40 kHz durante 15 min; y el tratamiento con microondas a razón de 3 W/g durante 4 y 6 min. El tratamiento biológico consistió en fermentar 200 g de residuo de zanahoria con *Lactobacillus salivarius* durante 24 h a 37 °C (Estufa PSelecta modelo Incudigit). A continuación, el residuo de zanahoria fresco y sometido a los diferentes pretratamientos se secó en un secador de bandejas de flujo transversal CLW750 TOP+ (Pol-eko Aparatura, Katowice, Polonia) con una velocidad de aire de 2 m/s. El residuo se distribuyó en forma de lámina de aproximadamente 1 cm de espesor sobre mallas perforadas de plástico (200 g por bandeja, excepto en el pretratamiento por ultrasonidos, donde se usaron 100 g por bandeja colocadas sobre las bandejas del secador. Todas las muestras provenían de un mismo lote y se secaron con aire a 60 °C durante 10 h.

Después del secado, el producto seco se molió durante 1 min en un molino de cuchillas (Modelo ML 469) en tandas de 50 g. Los polvos resultantes se almacenaron en bolsas de plástico con cierre zip para evitar el contacto con el oxígeno del aire y se conservaron en oscuridad hasta el momento del análisis.



**Figura 6.** Diagrama de flujo del proceso de transformación del residuo de zanahoria fresca sometida a diferentes pretratamientos termofísicos (AUTO, US y MW) o biológicos (F) en los diferentes productos en polvo mediante el secado por aire caliente a 60 °C (SAC).

A continuación, se muestran las abreviaturas para referirse a los polvos obtenidos según el pretratamiento aplicado para facilitar la lectura del documento:

**SAC60\_US:** Secado con aire a 60 °C, 10 h. Pretratamiento de ultrasonidos (40 kHz/g, 15 min)  
**SAC60\_MW4:** Secado con aire a 60 °C, 10 h. Pretratamiento de microondas (3 W/g, 4 min)

**SAC60\_MW6:** Secado con aire a 60 °C, 10 h. Pretratamiento de microondas (3 W/g, 6 min)

**SAC60\_AUTO:** Secado con aire a 60 °C, 10 h. Pretratamiento de autoclave (120 °C, 2h)

**FSAC60\_24:** Secado con aire a 60 °C, 10 h. Pretratamiento de fermentación con *Lactiplantibacillus plantarum* a 37 °C, 24 horas

**SAC60\_C:** Secado con aire a 60 °C, 10 h. Muestra sin pretratar

### 3.6. DETERMINACIONES ANALÍTICAS

Las determinaciones analíticas que se describen a continuación se aplicaron, para cada serie de experimentos, sobre el residuo sin procesar y sobre el residuo sometido a cada una de las operaciones unitarias que se sucedieron en el procesado.

#### 3.6.1. PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS

##### 3.6.1.1. ACTIVIDAD DEL AGUA

La actividad del agua ( $a_w$ ) se midió a 25 °C en un higrómetro de punto de rocío (Aqualab 4TE; Decagondevices Inc., Pullman WA, USA) previamente calibrado con disoluciones saturadas de referencia. y con una precisión de  $\pm 0,003$

##### 3.6.1.2. HUMEDAD

Para la determinación de la humedad ( $x_w$ ) se empleó el método gravimétrico de doble pesada propuesto para alimentos ricos en azúcares (AOAC 934.06, 2000) consistente en cuantificar la variación del peso que experimenta una cantidad conocida de muestra tras el secado hasta peso constante en una estufa de vacío (VacíoTemp-T Selecta, Barcelona, España) a 60 °C. La humedad se calculó, tal y como se indica en la **ecuación 2**, a partir del peso de la placa de Petri de vidrio empleada como recipiente para contener la muestra ( $M_0$ ), el peso de la placa de Petri de vidrio con la muestra antes de su secado en estufa ( $M_1$ ) y el peso de la placa de Petri de vidrio con la muestra tras su secado en estufa ( $M_2$ ), medidos con una balanza analítica (Mettler Toledo Inc., Barcelona, España) de 0,001 g de precisión.

$$x_w (\text{kg w/kg sh}) = \frac{M_1 - M_2}{M_1 - M_0} \quad \text{Ec. 2}$$

##### 3.6.1.3. SÓLIDOS SOLUBLES

De acuerdo con la **ecuación 3**, el contenido de sólidos solubles ( $x_{ss}$ ) de las muestras se calculó a partir de su humedad y de la medida de los grados Brix obtenida, según el método ISO 1743:1982, con un refractómetro de mesa termostatado a 20 °C (AbbeAtago, 3-T, Japón). En las muestras de zanahoria sin deshidratar, la medida de los grados Brix se realizó directamente sobre la fase líquida liberada tras aplicar cierta presión sobre la muestra ( $m_w = 0$  g). En los polvos de zanahoria, la medida de los grados Brix se realizó sobre la fase líquida resultante de mezclar 1 de polvo y 10 mL de agua bidestilada ( $m_w = 10$  g).

$$^{\circ}\text{Brix} = \frac{x_{ss}}{x_{ss} + (m_w + x_w)} \quad \text{Ec. 3}$$

##### 3.6.1.4. pH

La variación en el pH que experimentó el residuo de zanahoria durante su fermentación con diferentes bacterias ácido lácticas se midió con un pH-metro digital S20 SevenEasy™ (Mettler Toledo Inlab), previamente calibrado con las pertinentes disoluciones tampón a pH 7 y 4.

### 3.6.1.5. TAMAÑO DE PARTÍCULA

El tamaño de partícula de los polvos obtenidos se determinó tanto por vía seca como por vía húmeda utilizando un equipo de difracción laser Mastersizer 2000 (Malvern Instruments Limited, Worcester, Gran Bretaña), capaz de medir partículas en el rango de 0,02 a 2000  $\mu\text{m}$ . Para las mediciones por vía seca, se empleó una unidad de manipulación de muestras Scirocco 2000, que utiliza aire seco como agente dispersante a una presión de 2,5 bares y con un 60% de agitación.

En el caso de la vía húmeda, se utilizó una unidad Hydro 2000, con agua desionizada como agente dispersante, realizando lavados entre muestras. El análisis se realizó con un índice de refracción de 1,53 para la muestra, un índice de refracción de 1,35 para la fase dispersa y un índice de absorción de 0,1.

El análisis de la distribución del tamaño de partícula proporcionó el porcentaje de volumen total de las partículas dentro de intervalos de tamaño específicos, en relación con el volumen total de partículas. Los parámetros utilizados para caracterizar el tamaño de partícula incluyeron:

- D [4,3]: diámetro equivalente basado en el volumen de las partículas.
- D [3,2]: diámetro equivalente basado en el área superficial de las partículas.
- $d_{10}$ ,  $d_{50}$  y  $d_{90}$ : percentiles de la distribución del tamaño de partícula, indicando el tamaño por debajo del cual se encuentra el 10%, 50% y 90% del total de partículas, respectivamente.

### 3.6.2. PROPIEDADES ANTIOXIDANTES

Para la determinación de las propiedades antioxidantes se obtuvieron extractos a partir de la mezcla de 4-6 g de muestra sin deshidratar o 1 g de polvo y 10 mL de metanol al 80% (v/v) en agua bidestilada. Tras 1 h de agitación a 200 rpm en un agitador horizontal (COMECTA WY-100), la mezcla resultante se centrifugó a 11.000 rpm durante 5 min en una centrífuga Eppendorf Centrifuge 5804 R. Así, se separó la fase líquida de la fase sólida y se recogió la fase líquida para realizar todas las medidas. En algunos casos, fue necesario diluir los extractos para que la determinación espectrofotométrica estuviera dentro del rango lineal de las rectas de calibrado. A partir de una misma muestra se obtuvieron tres extractos diferentes y cada uno de los extractos se analizó por duplicado.

#### 3.6.2.1. CONTENIDO EN FENOLES TOTALES

Para determinar el contenido de fenoles totales de cada extracto se siguió el protocolo descrito por Singleton *et al.*, (1999) que consiste en que hacer reaccionar los fenoles presentes en el extracto de residuo de zanahoria con el reactivo de Folin-Ciocalteu, a pH básico, dando lugar a una coloración azul que se mide espectrofotométricamente (Cary 60 UV/Vis, Agilent, Australia) a 765 nm. Para ello, se mezclaron 0,125 mL de extracto, 0,125 mL del reactivo Folin-Ciocalteu y 0,5 mL de agua bidestilada en cada cubeta de espectrofotometría. Tras 6 min de reacción en oscuridad se adicionaron 1,25 mL de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  al 7% (m/v) y 1 mL de agua bidestilada y se dejó en oscuridad durante 90 min más. El blanco se obtuvo de la misma manera, pero sustituyendo el extracto por la misma cantidad del disolvente empleado en la extracción, en este caso, 0,125 mL de metanol al 80% (v/v) en agua bidestilada. Solo en el caso de los extractos obtenidos a partir de los polvos, se requirió diluir con el disolvente en una relación 1:8 (v/v).

Las medidas de absorbancia obtenidas se compararon con una curva patrón de ácido gálico (pureza  $\geq 98\%$ , Sigma-Aldrich) preparada en el intervalo de concentraciones comprendido entre 0-0,3 mg/mL. De esta forma, los resultados se expresaron en mg de Ácido Gálico Equivalente (EAG) por g de materia seca (mg EAG/g<sub>ms</sub>).

#### 3.6.2.2. CONTENIDO EN FLAVONOIDES TOTALES

Para determinar el contenido de flavonoides totales de cada extracto se empleó el método colorimétrico del cloruro de aluminio ( $\text{AlCl}_3$ ) (Luximon-Ramma *et al.*, 2002). El protocolo consistió en mezclar 1,5 mL del extracto y 1,5 mL de cloruro de aluminio ( $\text{AlCl}_3$ ) al 2 % (m/v) en metanol que es capaz de reaccionar con los flavonoides presentes en la muestra dando lugar a un color amarillento. La absorbancia resultante se midió tras 10 min de reacción a 368 nm con un espectrofotómetro (Cary



60 UV/Vis, Agilent, Australia). Al igual que en la medida del contenido de fenoles totales, se requirió de la preparación de un blanco en el que el extracto fue reemplazado por el mismo volumen de disolvente, en este caso, metanol al 80% (v/v) en agua bidestilada. Este ensayo se realizó por duplicado para cada extracto. Únicamente los extractos de las muestras pretratadas con microondas y de los polvos procedentes de residuos pretratados requirieron ser diluidos con el disolvente en una relación 1:2 (m/v) y 1:4 (m/v), respectivamente.

Una vez obtenidos los valores de absorbancia, se compararon con una curva patrón de quercetina (pureza  $\geq 95\%$ , Sigma-Aldrich) preparada en el intervalo de concentraciones comprendido entre 0-0,3 mg/mL. De esta forma, el contenido total de flavonoides se expresó en mg de Quercetina Equivalente (EQ) por g de materia seca (mg EQ/g<sub>ms</sub>).

### 3.6.2.3. CAPACIDAD ANTIOXIDANTE POR LOS MÉTODOS ABTS Y DPPH

A la hora de medir la capacidad antioxidante de los extractos obtenidos se aplicaron los métodos de los radicales DPPH (1,1-diphenyl-2-picryl hydrazyl) y ABTS (ácido 2,20-azobis-3-etil benzotiazolin-6-sulfónico). En el caso de la muestra fresca pretratada se realizaron diferentes diluciones del extracto en metanol al 80% (v/v) en agua bidestilada, dependiendo del pretratamiento empleado: 1:2 (m/v) para las muestras MW, 1:4 (m/v) para las muestras AUTO y 1:5 (m/v) para las muestras US y FERM. En el caso, de los polvos se realizó 1:20 (m/v) para todos los pretratamientos.

El método del radical ABTS (Re et al., 1999) consiste en medir la capacidad de los compuestos antioxidantes presentes en los extractos para reducir el radical libre ABTS<sup>+</sup>. Primero, se preparó una disolución de ABTS 7 mM (pureza  $\geq 99\%$ ; Sigma-Aldrich) y persulfato potásico 2,45 mM, la cual se incubó en oscuridad a temperatura ambiente durante 16 h para liberar el radical ABTS<sup>+</sup>. Una vez liberado, el radical ABTS<sup>+</sup> se diluyó en tampón fosfato, ajustando la disolución a una absorbancia de  $0,7 \pm 0,2$  medida a 734 nm. En cada cubeta de espectrofotómetro, se añadieron 0,1 mL de la muestra diluida y 2,3 mL de la disolución ABTS<sup>+</sup> en tampón fosfato, dejándose incubar en oscuridad durante 7 min. Pasado el tiempo de incubación, las absorbancias se midieron a 734 nm. Como referencia se empleó un blanco sustituyendo la muestra por metanol al 80% en agua bidestilada.

Las medidas de absorbancia obtenidas se compararon con una curva patrón de trólox (C<sub>14</sub>H<sub>18</sub>O<sub>4</sub>) (pureza  $\geq 97\%$ ; Sigma-Aldrich) en el intervalo de concentraciones comprendido entre 0-0,5 mg/mL. De esta forma, los resultados obtenidos a partir de la absorbancia medida en el espectrofotómetro (Cary 60 UV/Vis, Agilent, Australia) a 734 nm, se expresaron en mg de Trólox Equivalente (ET) por g de materia seca (mg ET/g<sub>ms</sub>).

En cuanto al método del radical DPPH (Shahidi *et al.*, 2006), consistió en la medición de la capacidad de los compuestos antioxidantes presentes en los extractos obtenidos con base a la reducción del radical DPPH<sup>+</sup> disuelto en metanol. Esta reacción produce un cambio colorimétrico de la disolución púrpura de DPPH medible con un espectrofotómetro (Cary 60 UV/Vis, Agilent, Australia) a 515 nm (Martínez-Las Heras *et al.*, 2017). En cada cubeta se adicionó 0,1 mL del extracto obtenido (0,1 mL de metanol al 80% (v/v) en agua bidestilada en el caso del blanco) y 2,9 mL de una disolución 0,06 mM de DPPH en metanol y se dejó reaccionar durante 60 min. Una vez transcurrido el tiempo, se midió la absorbancia con un espectrofotómetro (Cary 60 UV/Vis, Agilent, Australia) a 515 nm.

Las medidas de absorbancia obtenidas se expresaron en porcentaje de inhibición (I%) del radical libre según la **ecuación 1**. A partir del porcentaje de inhibición y comparando con una curva patrón de inhibición de trólox (pureza  $\geq 97\%$ ; Sigma-Aldrich) en el intervalo de concentraciones comprendido entre 0-0,2 mg/mL, se expresaron los resultados en mg de Equivalentes de Trólox (ET) por g de materia seca (mg ET/g<sub>ms</sub>).

$$I(\%) = \frac{A_B - A_M}{A_B} \times 100 \quad \text{Ec. 1}$$

donde:

I (%): porcentaje de inhibición del DPPH.

A<sub>B</sub>: absorbancia del blanco.  
A<sub>M</sub>: absorbancia de las muestras.

### 3.6.3. RECIENTOS MICROBIANOS

En todos los casos en los que se procedió a fermentar el residuo de zanahoria, el recuento de viables se llevó a cabo por el método de dilución seriada en agua de peptona tamponada estéril y posterior siembra en placa. En el caso de las muestras sólidas, la primera dilución se preparó en una bolsa de *Stomacher* en la que se mezclaron 3 g de muestra y 27 mL de agua de peptona tamponada estéril (ScharlauChemie®, Barcelona, España). Después de realizar todas las diluciones seriadas, se llevó a cabo la siembra en superficie de placas con medio agar MRS (ScharlauChemie®, Barcelona, España) las cuales se incubaron a 37 °C durante 24-48 h. Transcurrido este tiempo, se procedió al recuento de las colonias presentes, siempre que este número estuviera comprendido entre 30 y 300.

### 3.7. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Los resultados obtenidos fueron analizados estadísticamente mediante el programa Statgraphics Centurion (versión Centurion XVII.I, StatPoint Technologies, Inc.). Se llevaron a cabo análisis de varianza (ANOVA simple y multifactorial) para evaluar, con un nivel de confianza del 95% (p-valor < 0,05), el grado de significancia estadística de las diferencias encontradas entre medias. Para ello, se empleó el método LSD de Fisher, previa comprobación de la normalidad de los datos.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. ESTUDIO PRELIMINAR DE SECADO POR AIRE CALIENTE

En primer lugar, se realizó un estudio preliminar de secado por aire caliente del residuo de zanahoria fresca y fermentada durante 24 h a 37 °C con *Lactiplantibacillus plantarum* en secadores de bancada. El objetivo fue seleccionar la temperatura de secado más apropiada para deshidratar el residuo, teniendo en cuenta el gasto energético (temperatura y tiempo de secado). Además, en el caso del producto fermentado, se tuvo en cuenta la viabilidad del microorganismo y se buscaron valores de actividad del agua por debajo de 0,3 que asegurasen la estabilidad de los productos en polvo obtenidos (Vesterlund et al., 2012; Calín-Sánchez, 2020). Se partió de los tiempos de secado establecidos en estudios previos realizados en el mismo laboratorio con tallo de brócoli (Bas-Bellver et al., 2022), y se concretaron mediante la medida de la  $a_w$  en el producto seco, como se indica en la **Tabla 1**.

**Tabla 1.** Actividad del agua ( $a_w$ ) medida sobre residuo triturado sin fermentar y fermentado, a las distintas temperaturas del aire ensayadas. SAC50: muestra secada por aire caliente a 50°C; SAC60: muestra secada por aire caliente a 60°C; SAC70: muestra secada por aire caliente a 70°C; FSAC50: muestra fermentada secada por aire caliente a 50 °C; FSAC60: muestra fermentada secada por aire caliente a 60 °C; FSAC70: muestra fermentada secada por aire caliente a 70 °C.

Muestra	Tiempo de secado (h)	$a_w$
SAC50	14	0,33 ± 0,03
SAC60	10	0,18 ± 0,03
SAC70	6	0,26 ± 0,03
FSAC50	12	0,30 ± 0,03
FSAC60	7	0,20 ± 0,03
FSAC70	5	0,23 ± 0,03

Los valores de  $a_w$  obtenidos sugieren que el secado permitió deshidratar las muestras hasta niveles de  $a_w$  que aseguran su estabilidad. Cabe destacar que, durante la molienda posterior, parte del agua

retenida en el producto se libera, aumentando ligeramente los valores de la actividad del agua. Por este motivo, algunos polvos presentaron valores de  $a_w$  por encima del valor objetivo de 0,3. Según puede observarse en la **Tabla 1**, el tiempo necesario para reducir la  $a_w$  hasta un valor de 0,3 se reduce a medida que aumenta la temperatura, lo cual se debe a la menor humedad relativa y a la mayor capacidad de deshidratación que tiene el aire a mayor temperatura. Por otro lado, se observa que la fermentación conlleva una reducción de los tiempos de secado, lo cual podría deberse a una mayor disponibilidad del agua debido a la degradación del tejido promovida por el metabolismo microbiano, bien porque ésta esté menos ligada al tejido, o bien porque la resistencia a la transferencia de agua por el interior del tejido se vea reducida (Bas-Bellver, 2023c; Sharma et al., 2020).

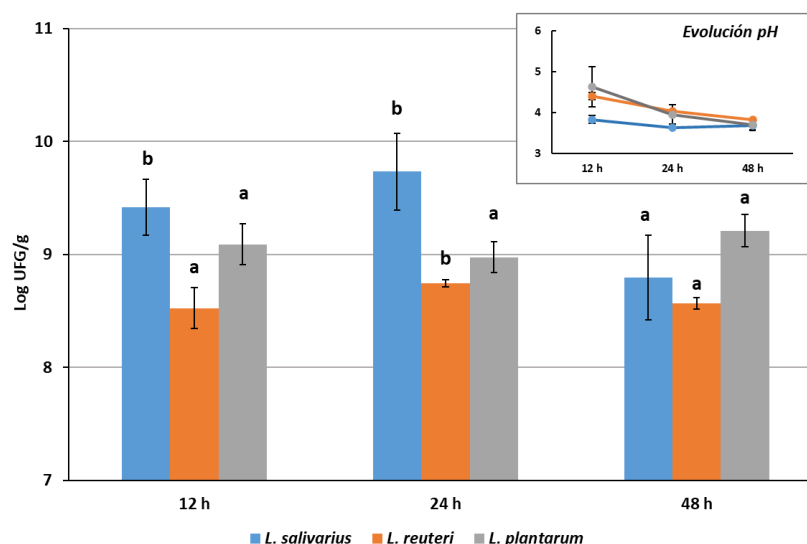
Durante este estudio preliminar se comprobó que el microorganismo seleccionado podría no estar creciendo adecuadamente en el sustrato, ya que los recuentos efectuados sobre el polvo de residuo de zanahoria fermentado resultaron inferiores a  $10^4$  ufc/g en todos los casos. Por este motivo, se decidió ampliar el estudio a otros microorganismos. De este modo, y según se ha descrito en el apartado de material y métodos, se probaron cepas de *Lactiplantibacillus plantarum*, *Limosilactobacillus reuteri* y *Lactobacillus salivarius*. Los resultados de este estudio se presentan a continuación, junto con el resto de pretratamientos evaluados.

## 4.2. EFECTO DE DIFERENTES PRETRATAMIENTOS BIOLÓGICOS Y TERMOFÍSICOS SOBRE LAS PROPIEDADES DEL RESIDUO DE ZANAHORIA

### 4.2.1. FERMENTACIÓN DEL RESIDUO DE ZANAHORIA CON *Lactiplantibacillus plantarum*, *Limosilactobacillus reuteri* y *Lactobacillus salivarius*

Este estudio previo se realizó con la intención de seleccionar el microorganismo que resultara en una mayor concentración microbiana en el residuo de zanahoria triturado. En los últimos años, los alimentos probióticos no lácteos han ganado importancia debido a las demandas de los consumidores, según se ha descrito en la introducción. Estos alimentos incluyen frutas, verduras y cereales y tienen un futuro prometedor (Martins et al., 2013). Existen diversos factores que pueden afectar a la viabilidad celular como son el pH, la acidez, la actividad del agua, la temperatura de incubación, la presencia de sal, azúcar y otras sustancias, así como las condiciones de procesado, almacenamiento, manipulación y transporte (Perricone et al., 2015).

En la **Figura 7** se presentan los resultados obtenidos durante la fermentación del residuo de zanahoria triturado con diferentes microorganismos probióticos, en particular, *Lactiplantibacillus plantarum*, *Limosilactobacillus reuteri* y *Lactobacillus salivarius*. Se muestran los resultados correspondientes a la concentración bacteriana (log UFC/g producto) obtenida para cada una de las tres cepas ensayadas, tras 12, 24 y 48 h de fermentación, así como la evolución del pH. Como se puede observar, la cepa que mayor concentración bacteriana ha alcanzado para todos los tiempos ha sido *L. salivarius*, con un máximo en torno a  $10^9$  UFC/g transcurridas 24 h desde el inicio de la fermentación. Esta mayor concentración microbiana coincide con el menor valor de pH registrado en el residuo de zanahoria fermentado con *L. salivarius* durante el mismo periodo. A partir de las 24 h, el número de viables de *L. salivarius* comenzó a disminuir y el pH se mantuvo constante. Una tendencia similar se puede observar en el caso de *L. reuteri*, mientras que *L. plantarum* sigue aumentando su concentración y disminuyendo el pH pasadas las 24 h. Esto último también se ha observado en otro estudio sobre una bebida fermentada compuesta por manzanas, peras y zanahorias, en la que la concentración de bacterias ácido lácticas aumentó durante 24 h y disminuyó pasado este tiempo (Yang et al., 2018). Cabe destacar que, en todos los casos, el recuento de viables resultó ser superior a  $10^7$  UFC/g, por lo que todos los productos resultantes podrían considerarse potencialmente probióticos.



**Figura 7.** Concentración de *Lactobacillus salivarius* spp., *Limosilactobacillus reuteri* y *Lactiplantibacillus plantarum* en el residuo de zanahoria fresca tras 12, 24 o 48 h de incubación y evolución del pH durante esos tiempos. Logaritmo de unidades formadoras de colonias (UFC) por gramo de producto. <sup>a,b,c</sup>...letras diferentes en la misma serie indican diferencias estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95%.

Según un estudio previo de fermentación de canola con *L. salivarius* (Abdullah et al., 2014), la reducción en el pH con el tiempo se debe a la formación de ácidos orgánicos. Sin embargo, el aumento en el pH observado tras fermentar tomate con *L. casei* durante 24 h se atribuyó a la liberación de glucoalcaloides que pueden interferir en la medida del pH (Liu et al., 2018). Además, para seleccionar la cepa microbiana que resulte en un polvo de zanahoria con potencial efecto probiótico, no solo se debe tener en cuenta la capacidad de la cepa para crecer y mantenerse viva en el material vegetal fresco, sino también su habilidad para resistir las condiciones de procesado y almacenamiento. En este sentido, según un estudio dirigido a la obtención de un snack de manzana probiótico mediante impregnación a vacío y posterior deshidratación, la supervivencia de *L. salivarius* frente al secado con aire a 60 °C es aceptable (Betoret et al., 2020).

Una vez seleccionada la cepa microbiana con la que fermentar el residuo de zanahoria, se decidió repetir el estudio de fermentación con esta cepa y evaluar de forma exhaustiva cómo el tiempo de fermentación (12, 24 y 48 h) afecta a las propiedades fisicoquímicas y antioxidantes del material vegetal, así como al correspondiente crecimiento microbiano.

En la **Tabla 2** se presentan los valores obtenidos para el contenido de humedad (%), la actividad del agua ( $a_w$ ) y el contenido de sólidos solubles ( $x_{ss}$ ) del residuo de zanahoria en diferentes instantes del proceso de fermentación con *L. salivarius*.

**Tabla 2.** Propiedades fisicoquímicas del residuo de zanahoria fermentado.

Media  $\pm$  desviación estándar de seis repeticiones. F\_12: residuo de zanahoria incubado con *L. salivarius* durante 12 h; F\_24: residuo de zanahoria incubado con *L. salivarius* durante 24 h; F\_48: residuo de zanahoria incubado con *L. salivarius* durante 48 h; F\_C: muestra control (residuo de zanahoria sin inocular).

MUESTRA	% Humedad (g agua/100 g)	$a_w$	$x_{ss}$ ( $g_{ss}/g_{total}$ )	pH
F_12	89 $\pm$ 2 <sup>a</sup>	0,9931 $\pm$ 0,0011 <sup>b</sup>	0,834 $\pm$ 0,011 <sup>c</sup>	3,83 $\pm$ 0,10 <sup>b</sup>
F_24	88 $\pm$ 10 <sup>a</sup>	0,990 $\pm$ 0,002 <sup>a</sup>	0,78 $\pm$ 0,02 <sup>b</sup>	3,63 $\pm$ 0,01 <sup>a</sup>
F_48	91,2 $\pm$ 1,3 <sup>a</sup>	0,994 $\pm$ 0,002 <sup>b</sup>	0,76 $\pm$ 0,02 <sup>a</sup>	3,68 $\pm$ 0,12 <sup>a</sup>
F_C	87,89 $\pm$ 0,08 <sup>a</sup>	0,993 $\pm$ 0,001 <sup>b</sup>	0,998 $\pm$ 0,013 <sup>d</sup>	5,512 $\pm$ 0,008 <sup>c</sup>

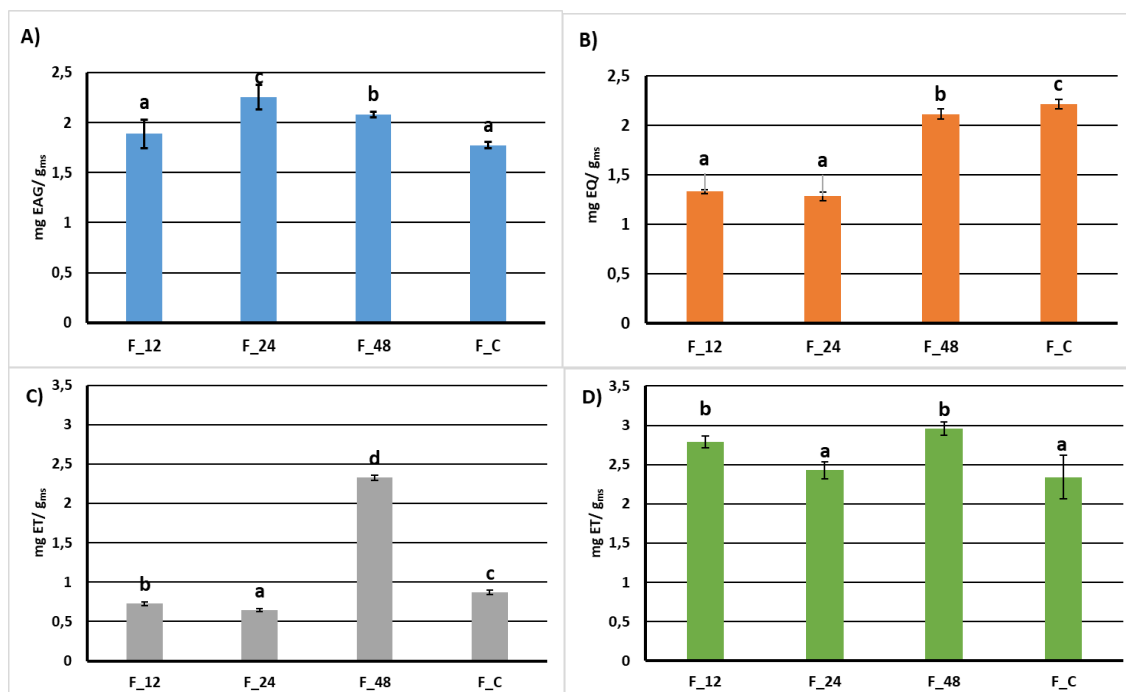
<sup>a,b,c</sup>...letras diferentes en la misma columna indican diferencias estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95%.

En primer lugar, no se observaron diferencias estadísticamente significativas ( $p$ -valor  $> 0,05$ ) en los valores de humedad (%) evaluados a los distintos tiempos de fermentación. No obstante, sí se obtuvieron diferencias estadísticamente significativas para la  $a_w$  ( $p$ -valor  $< 0,05$ ), aunque cabe destacar que las diferencias son mínimas y la desviación estándar muy baja. En cualquier caso, el crecimiento microbiano puede tener cierto impacto sobre los valores de humedad y  $a_w$ . Por un lado, la acción enzimática, resultado del metabolismo microbiano, rompe y permeabiliza estructuras, liberando agua retenida en el tejido. Esta disgregación de la matriz vegetal se debe a la capacidad de las bacterias lácticas de metabolizar y transformar proteínas, celulosa y otras moléculas complejas en compuestos más simples, permeabilizando y solubilizando estructuras (Yang et al., 2024).

El contenido de sólidos solubles disminuyó significativamente con el tiempo de fermentación ( $p$ -valor  $< 0,05$ ). Otros trabajos también han hecho referencia a este fenómeno durante la fermentación de distintas hortalizas, entre ellas el tomate, el chile rojo, la calabaza y la zanahoria, siendo ésta última la que experimentó una mayor disminución en el contenido de sólidos solubles (Thorat et al., 2017). Previsiblemente, este resultado se debe al consumo de azúcares por parte de las bacterias, en este caso *L. salivarius*, a lo largo del proceso de fermentación. No obstante, cabe destacar que los microorganismos no solamente habrán consumido los azúcares simples inicialmente presentes en el residuo, sino que habrán liberado azúcares a partir de polisacáridos complejos, gracias a la acción enzimática consecuencia del metabolismo microbiano.

Con relación al pH, se observa una disminución progresiva a medida que avanza la fermentación, alcanzándose un valor mínimo después de 24 h que se mantiene constante hasta el final del proceso. Este descenso en el pH se atribuye a la capacidad de las bacterias ácido lácticas para descomponer carbohidratos y grasas, dando lugar a ácidos orgánicos como el ácido láctico, lo que reduce el pH del medio, en este caso, el residuo vegetal.

En la **Figura 8** se muestra la evolución de las propiedades antioxidantes del residuo de zanahoria durante la fermentación con *L. salivarius*.



**Figura 8.** Evolución de las propiedades antioxidantes del residuo de zanahoria durante la fermentación con *L. salivarius* spp. *salivarius*. A) Contenido de fenoles totales en mg equivalentes de ácido gálico (EAG) por g de materia seca. B) Contenido de flavonoides totales en mg equivalentes de quercetina (EQ) por g de materia seca. C) Capacidad antioxidante medida por el método DPPH expresada en mg equivalentes de trólox (ET) por g de materia seca. D) Capacidad

antioxidante medida por el método ABTS expresada en mg equivalentes de trólox (ET) por g de materia seca. F\_12: Residuo de zanahoria fermentado durante 12 h; F\_24: residuo de zanahoria fermentado durante 24 h; F\_48: residuo de zanahoria fermentado durante 48 h; F\_C: muestra control (residuo de zanahoria sin inocular). <sup>a,b,c...</sup>letras diferentes para un mismo compuesto indican diferencias estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95%.

El contenido de fenoles totales de las distintas muestras mostró diferencias estadísticamente significativas ( $p$ -valor  $< 0,05$ ). Como se puede comprobar en la **Figura 8**, el contenido fenólico alcanzó un máximo tras 24 h de fermentación, similar a lo observado en un estudio sobre kombucha, donde el contenido fenólico aumentaba ligeramente con el tiempo de fermentación (Chu & Chen, 2006). Este aumento puede atribuirse a la capacidad de las bacterias lácticas para producir  $\beta$ -glucosidasa, que cataliza la liberación de compuestos fenólicos que se encuentran asociados con azúcares, dando lugar a glucósidos (Robbins, 1980). Sin embargo, a las 48 h se observa una disminución en el contenido fenólico. En estudios anteriores sobre una bebida fermentada de manzanas, peras y zanahorias, se observó un aumento en los primeros 8 días de fermentación, seguido de una disminución en el contenido fenólico. Esto sugiere que las bacterias ácido lácticas degradarían los fenoles para poder seguir creciendo (Yang et al., 2018).

En cuanto al contenido de flavonoides totales, como se muestra en la **Figura 8**, se ha producido una disminución significativa ( $p$ -valor  $< 0,05$ ) en todas las muestras fermentadas con respecto a la muestra control sin inocular. Muchos estudios han reportado un aumento en el contenido de flavonoides totales durante la fermentación, como el de la bebida fermentada mencionada anteriormente, que mostró un aumento gradual en el contenido de flavonoides totales con el tiempo de fermentación (Yang et al., 2018). Sin embargo, en otro trabajo sobre semillas de okra se registró una disminución en el contenido de flavonoides a las 120 h de fermentación (Adetuyi & Ibrahim, 2014). Estos hallazgos sugieren una posible degradación de los flavonoides causada por la cepa *L. salivarius*, o bien la conversión en formas menos reactivas.

En la **Figura 8** se presentan la capacidad antirradical (mg de trólox equivalente por g de materia seca) obtenida para cada muestra fermentada, por los métodos DPPH y ABTS. Ambos métodos revelaron diferencias estadísticamente significativas ( $p$ -valor  $< 0,05$ ). Según el método del radical DPPH, la capacidad antioxidante del residuo de zanahoria disminuyó durante las primeras 24 h de fermentación; sin embargo, después de 48 h, la capacidad antioxidante del residuo de zanahoria resultó 2,7 veces superior a la del residuo control sin inocular. Esto coincide con lo observado durante la decocción de té, donde también se observó una reducción en la capacidad antioxidante al inicio de la fermentación en comparación con la muestra control y, después de 15 días de fermentación, resultó ser 1,7 veces superior (Chu & Chen, 2006). Un posible motivo podría ser la capacidad de la cepa para producir nuevos compuestos antioxidantes o su liberación mediada por la degradación de las paredes celulares de las hojas del té y, en el presente trabajo, del residuo de zanahoria.

Según el método del radical ABTS, las muestras fermentadas durante 12 y 48 h presentaron una capacidad antioxidante significativamente más elevada ( $p$ -valor  $< 0,05$ ). Este aumento en la capacidad antioxidante con el tiempo de fermentación también se ha observado en otros sustratos, como la kombucha (Chu & Chen, 2006) o en ajo, tomate, coliflor y pepino (Sayın, 2015). Una posible explicación para este fenómeno podría ser que las bacterias lácticas empleadas en la fermentación poseen propiedades antioxidantes que minimizan la generación de especies reactivas de oxígeno (ROS). Además, la liberación progresiva de compuestos fenólicos simples mediante hidrólisis ácida y enzimática de compuestos polifenólicos también podría contribuir a este aumento en la capacidad antioxidante con el tiempo de fermentación.

Por todo lo comentado en estos apartados, se optó por fermentar el residuo de zanahoria triturada con *L. salivarius* durante 24 h como tratamiento biológico previo al secado con aire a 60 °C y molienda final necesarios para obtener el polvo de zanahoria, priorizando así el recuento de viables, el contenido de fenoles totales y los cambios de pH observados.

#### 4.2.2. TRATAMIENTO DEL RESIDUO DE ZANAHORIA CON ULTRASONIDOS

En este apartado se muestran los resultados del estudio que evalúa el efecto del tratamiento con diferentes frecuencias de ultrasonidos por unidad de masa (40 kHz para 100 ó 200 g de muestra) durante 5, 10 y 15 min sobre las propiedades antioxidantes y fisicoquímicas del residuo de zanahoria.

En la **Tabla 3** se muestran los valores correspondientes al contenido de humedad (%), a la actividad del agua ( $a_w$ ) y al contenido de sólidos solubles ( $x_{ss}$ ) del residuo de zanahoria perteneciente al mismo lote, pretratado por ultrasonidos y sin pretratar.

**Tabla 2.** Propiedades fisicoquímicas del residuo de zanahoria pretratado por ultrasonidos.

Media  $\pm$  desviación estándar de tres repeticiones. US100\_5: 100 g de muestra expuesta durante 5 min a ultrasonidos; US100\_10: 100 g de muestra expuesta durante 10 min a ultrasonidos; US100\_15: 100 g de muestra expuesta durante 15 min a ultrasonidos; US200\_5: 200 g de muestra expuesta durante 5 min a ultrasonidos; US200\_10: 200 g de muestra expuesta durante 10 min a ultrasonidos; US200\_15: 200 g de muestra expuesta durante 15 min a ultrasonidos; US\_C: muestra control.

Muestra	% Humedad	$a_w$	$x_{ss}$ (g <sub>ss</sub> /g <sub>total</sub> )
US100_5	90,9 $\pm$ 0,2 <sup>a</sup>	0,9890 $\pm$ 0,0013 <sup>a</sup>	0,767 $\pm$ 0,007 <sup>a</sup>
US100_10	91,4 $\pm$ 0,2 <sup>a</sup>	0,995 $\pm$ 0,003 <sup>b</sup>	0,759 $\pm$ 0,012 <sup>a</sup>
US100_15	91,12 $\pm$ 0,11 <sup>a</sup>	0,9942 $\pm$ 0,0008 <sup>b</sup>	0,754 $\pm$ 0,007 <sup>a</sup>
US200_5	91,5 $\pm$ 1,7 <sup>a</sup>	0,999 $\pm$ 0,003 <sup>c</sup>	0,785 $\pm$ 0,014 <sup>b</sup>
US200_10	91,0 $\pm$ 0,2 <sup>a</sup>	0,995 $\pm$ 0,003 <sup>bc</sup>	0,771 $\pm$ 0,012 <sup>ab</sup>
US200_15	91,4 $\pm$ 0,4 <sup>a</sup>	0,996 $\pm$ 0,002 <sup>bc</sup>	0,767 $\pm$ 0,007 <sup>ab</sup>
US_C	91,3 $\pm$ 0,4 <sup>a</sup>	0,9941 $\pm$ 0,0004 <sup>b</sup>	0,755 $\pm$ 0,007 <sup>a</sup>

<sup>a,b,c</sup>...letras diferentes en la misma columna indican diferencias estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95%.

En el caso del contenido de sólidos solubles ( $x_{ss}$ ), se registraron valores significativamente más elevados (p-valor < 0,05) en las muestras tratadas con 40 kHz para 200 g durante 5 min. De forma similar, en un estudio con paja de trigo se comprobó que al aumentar el tiempo de sonicación disminuía el contenido de glucosa y arabinosa (Sun et al., 2002), como también se observó en otro estudio con mazorcas de maíz (Ebringerová et al., 1998). Este suceso podría deberse a que la glucosa se encuentre probablemente en las cadenas laterales de las hemicelulosas y se libera más fácilmente con un tiempo corto de tratamiento (Sun et al., 2002). Por otro lado, numerosos estudios realizados sobre diferentes hortalizas afirman que, a mayor duración del tratamiento mediante ultrasonidos, mayor es el contenido de sólidos solubles (Gani et al., 2016; Zou & Jiang, 2016) lo cual podría estar asociado a la destrucción de los tejidos vegetales y de la pared celular debido al tratamiento por ultrasonidos (Zou et al., 2010).

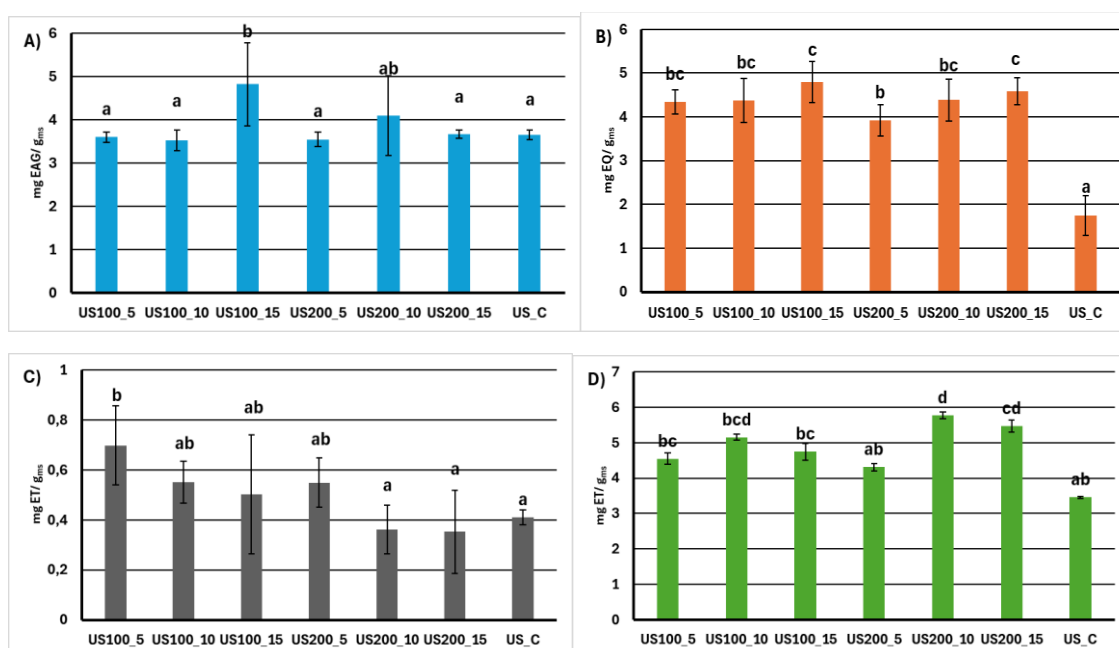
En la **Figura 9** se muestra el contenido de fenoles y flavonoides totales del residuo de zanahoria sin pretratar y pretratado con diferentes frecuencias de ultrasonidos por unidad de masa (40 kHz para 100 ó 200 g de muestra) durante 5, 10 y 15 min.

En primer lugar, se ha estudiado la interacción existente entre los distintos tiempos de exposición a ultrasonidos y la cantidad de muestra tratada. Solamente se observaron diferencias significativas en el contenido de fenoles totales (p-valor < 0,05).

Tal y como se muestra en la **Figura 9**, la muestra que ha experimentado un aumento significativo desde el punto de vista estadístico en el contenido de fenoles totales ha sido la muestra de 100 g expuesta a 40 kHz de ultrasonidos durante 15 min, siendo este tratamiento el más intenso de los estudiados. De forma similar, un estudio sobre el efecto del tratamiento con ultrasonidos en las propiedades antioxidantes de la uchuva mostró un aumento del 4,3% al 14,6% al incrementar de 10 a 40 min el tiempo de tratamiento (Ordóñez-Santos et al., 2017). También el contenido fenólico de los jugos de lima, zanahoria, naranja y pera aumentó tras el tratamiento con ultrasonidos (Jabbar et al., 2013; Khandpur & Gogate, 2015; Saeeduddin et al., 2016). Los ultrasonidos causan una ruptura mecánica de las paredes celulares, facilitando la liberación de compuestos fenólicos que están unidos

a la matriz celular. Por tanto, a mayor tiempo de exposición, mayor es el grado de ruptura celular, liberando así más compuestos fenólicos que se encuentran unidos a pectina, celulosa, hemicelulosa y lignina (Jiménez-Sánchez et al., 2017; Tomadoni et al., 2017). Por otra parte, un estudio con uva empleando distintas cantidades de muestra (0,5, 1 y 2 g) demostró que, al aplicar el tratamiento de ultrasonidos, la recuperación de compuestos fenólicos fue menor con 2 g de muestra comparado con 1 g de muestra (Carrera et al., 2012). Una posible explicación para este hecho es que, al emplear una cantidad de muestra más pequeña, manteniendo la frecuencia, la energía disponible por unidad de masa de muestra es mayor. En contraposición, al emplear una mayor cantidad de muestra puede que haya una menor uniformidad en la cavitación, provocando que haya zonas de la muestra que no reciben suficiente energía.

En cuanto al contenido de flavonoides totales, se observa un aumento significativo con el tratamiento de ultrasonidos, destacando las muestras expuestas durante 15 min para cada una de las dos frecuencias por unidad de masa ensayadas. De manera similar, en el caso del zumo de pomelo tratado por ultrasonidos, se observó un aumento en el contenido de flavonoides totales conforme se aumentaba el tiempo de tratamiento hasta los 90 min (Aadil et al., 2013).



**Figura 9.** A) Contenido de fenoles totales expresados en mg de ácido gálico equivalentes (EAG) por g de materia seca. B) Contenido de flavonoides totales expresados en mg de quercetina equivalentes (EQ) por g de materia seca. C) Capacidad antioxidante medida por el método DPPH expresada en mg de trólox equivalentes (ET) por g de materia seca. D) Capacidad antioxidante medida por el método ABTS expresada en mg de trólox equivalentes (ET) por g de materia seca. US100\_5: 100 g de muestra expuesta durante 5 min a ultrasonidos; US100\_10: 100 g de muestra expuesta durante 10 min a ultrasonidos; 100 g de muestra expuesta durante 15 min a ultrasonidos; US200\_5: 200 g de muestra expuesta durante 5 min a ultrasonidos; US200\_10: 200 g de muestra expuesta durante 10 min a ultrasonidos; US200\_15: 200 g de muestra expuesta durante 15 min a ultrasonidos; US\_C: muestra control. <sup>a,b,c...</sup>letras diferentes para un mismo compuesto indican diferencias estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95%.

En general, el tratamiento del residuo de zanahoria con ultrasonidos produjo un aumento en la capacidad antioxidante.

Por un lado, la actividad antioxidante medida por el método del radical DPPH mostró un valor significativamente más elevado cuando los 40 kHz de frecuencia de ultrasonidos se aplicaron a 100 g de residuo de zanahoria durante 5 min. En un estudio con frutos del árbol terebinto también se observó una disminución en la actividad antioxidante al aumentar el tiempo de tratamiento de 30 a



45 min (Özcan et al., 2020) y esto pudo deberse a que la exposición prolongada de los compuestos bioactivos al efecto de los ultrasonidos produjo su degradación.

Por otro lado, todas las muestras tratadas con ultrasonidos presentaron valores de la actividad antioxidante medida por el método del radical ABTS significativamente más elevados ( $p$ -valor  $< 0,05$ ) que la muestra control. El aumento de 5 a 10 min en el tiempo de tratamiento elevó la capacidad de neutralizar el radical ABTS, pero tiempos de procesamiento superiores a 10 min resultaron, para ambas relaciones entre la frecuencia de ultrasonidos y la masa de muestra estudiadas, en una disminución de la actividad antioxidante. Este fenómeno se ve respaldado por un estudio sobre el impacto de los ultrasonidos en hojas de *Terminalia catappa*, donde se observó que, a partir de los 40 min de tratamiento a una frecuencia de 42 kHz, se daba una reducción en la actividad antioxidante medida por el método ABTS (Annegowda et al., 2010). Esto indicó que se extrajeron más compuestos antioxidantes con un tiempo no muy prolongado.

A partir de estos resultados, se seleccionó para los estudios de secado posteriores el tratamiento de 100 g de muestra a 40 kHz durante 15 min debido al aumento en el contenido fenólico y de flavonoides y a la conservación de la capacidad antioxidante total que supone con respecto a la muestra control.

#### 4.2.3. TRATAMIENTO DEL RESIDUO DE ZANAHORIA CON MICROONDAS

En este apartado se muestran los resultados del estudio que evalúa el efecto del tratamiento con diferentes potencias de microondas (1,5 y 3 W/g) durante 2, 4 y 6 min sobre las propiedades fisicoquímicas y antioxidantes del residuo de zanahoria.

En la **Tabla 4** se presentan los distintos valores obtenidos con relación al contenido de humedad (%), a la actividad del agua ( $a_w$ ) y al contenido de sólidos solubles ( $x_{ss}$ ) del residuo de zanahoria pretratado y sin pretratar con microondas.

**Tabla 3.** Propiedades fisicoquímicas del residuo de zanahoria pretratado con microondas.

Media  $\pm$  desviación estándar de tres repeticiones. MW300\_2: 200 g de muestra sometidos durante 2 min a una potencia de 300 W de microondas; MW300\_4: muestra expuesta durante 4 min a una potencia de 300 W de microondas; MW300\_6: muestra expuesta durante 6 min a una potencia de 300 W de microondas; MW600\_2: muestra expuesta durante 2 min a una potencia de 600 W de microondas; MW600\_4: muestra expuesta durante 4 min a una potencia de 300 W; MW600\_6: muestra expuesta durante 6 min a una potencia de 300 W; MW\_C: muestra control.

Muestra	% Humedad	$a_w$	$x_{ss}$ (g <sub>ss</sub> /g <sub>total</sub> )
MW300_2	90,3 $\pm$ 0,2 <sup>b</sup>	0,996 $\pm$ 0,002 <sup>a</sup>	0,66 $\pm$ 0,03 <sup>a</sup>
MW300_4	90,08 $\pm$ 0,12 <sup>b</sup>	0,9938 $\pm$ 0,0002 <sup>a</sup>	0,727 $\pm$ 0,007 <sup>b</sup>
MW300_6	90,0 $\pm$ 0,3 <sup>b</sup>	0,9924 $\pm$ 0,0011 <sup>a</sup>	0,705 $\pm$ 0,012 <sup>ab</sup>
MW600_2	92,1 $\pm$ 1,9 <sup>c</sup>	0,993 $\pm$ 0,002 <sup>a</sup>	0,74 $\pm$ 0,03 <sup>b</sup>
MW600_4	89,3 $\pm$ 0,4 <sup>b</sup>	0,994 $\pm$ 0,002 <sup>a</sup>	0,816 $\pm$ 0,007 <sup>c</sup>
MW600_6	87,10 $\pm$ 0,12 <sup>a</sup>	0,9925 $\pm$ 0,0013 <sup>a</sup>	0,92 $\pm$ 0,07 <sup>d</sup>
MW_C	90,313 $\pm$ 0,008 <sup>b</sup>	0,994 $\pm$ 0,003 <sup>a</sup>	0,727 $\pm$ 0,009 <sup>b</sup>

<sup>a,b,c</sup>...letras diferentes en la misma columna indican diferencias estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95%.

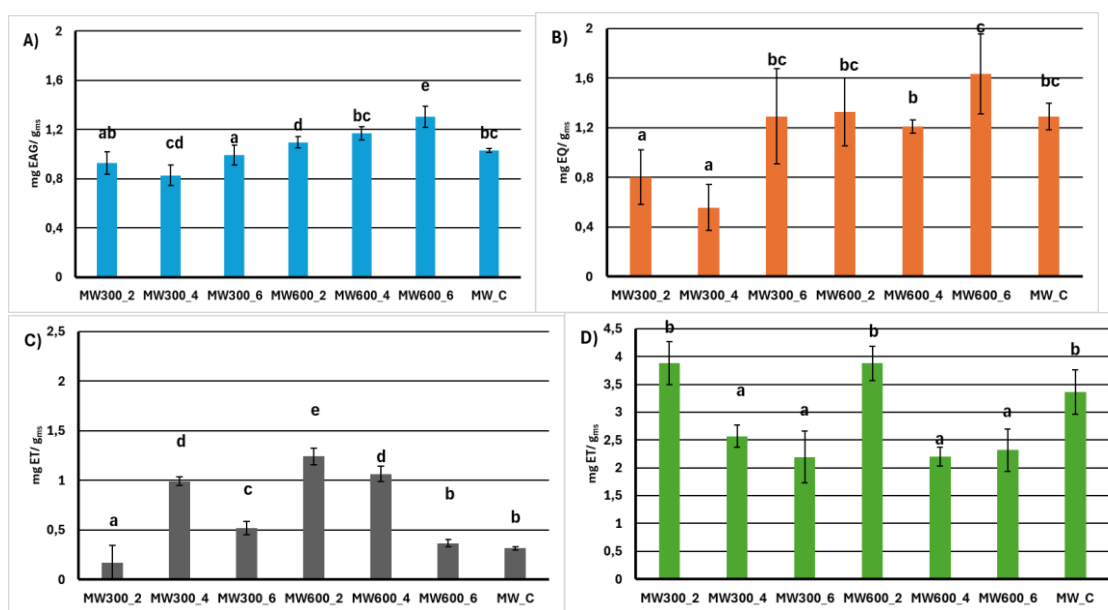
Como se muestra en la **Tabla 4**, la humedad del residuo de zanahoria alcanzó un valor máximo y mínimo después del tratamiento a 3 W/g durante 2 y 6 min, respectivamente. El incremento en la humedad podría atribuirse al aumento de la vaporización del agua contenida en las vacuolas durante el calentamiento de la muestra, provocado por el efecto de las microondas sobre las moléculas de agua mediante polarización dipolar y conducción iónica (Araujo et al., 2021). Esto aumenta la presión interna y puede resultar en la liberación del agua contenida en las vacuolas (Chan et al., 2016), no lográndose la evaporación de esta agua debido al corto tiempo de tratamiento. Por otra parte, la reducción significativa en la humedad podría deberse a que el vapor de agua retenido al principio del calentamiento se ha eliminado con el aumento del tiempo de tratamiento.

Con relación al contenido de sólidos solubles ( $x_{ss}$ ), se produjo un descenso significativo desde un punto de vista estadístico ( $p$ -valor  $< 0,05$ ) después de tratar el residuo de zanahoria a 1,5 W/g durante 2 min, pero aumentó significativamente tras el tratamiento a 3 W/g durante 4 y 6 min. En el proceso de obtención de bioetanol a partir de maíz sometido a microondas se observó que la concentración de glucosa después de 5 min a 80 W llegaba a su máximo (Nikolić et al., 2011), aunque también se conoce que el tratamiento por MW puede conducir a la degradación térmica de azúcares simples (Conesa et al., 2016).

En la **Figura 10** se representa el contenido de fenoles y flavonoides totales del residuo de zanahoria pretratado y sin pretratar con microondas.

Tal y como se muestra en la **Figura 10**, el contenido total de fenoles presentó diferencias estadísticamente significativas ( $p$ -valor  $< 0,05$ ) entre las distintas muestras. La muestra sometida a una mayor potencia de microondas durante un periodo prolongado (MW600\_6), resultó ser la que experimentó el mayor incremento en el contenido fenólico. Para esta potencia, se aprecia un aumento progresivo en el contenido fenólico con el tiempo de tratamiento, en línea con lo observado en un estudio previo llevado a cabo con brócoli (Jokić et al., 2012) y en otro con residuos de piña destinados a la producción de bioetanol (Conesa et al., 2016). El aumento en el contenido fenólico asociado al tratamiento por microondas se atribuye a la solubilización de la lignina como resultado del impacto de las ondas electromagnéticas en la matriz lignocelulósica (Conesa et al., 2016). Por otro lado, se ha constatado una reducción en el contenido fenólico de las muestras sometidas a una potencia de microondas más baja durante un tiempo más corto (MW300\_2 y MW300\_4), condiciones que no favorecen la liberación de los compuestos fenólicos, tal y como sucedió al tratar una microalga con microondas a la potencia más baja de las estudiadas de 250 W (del Río et al., 2021).

El contenido de flavonoides totales del residuo de zanahoria también experimentó variaciones estadísticamente significativas ( $p$ -valor  $< 0,05$ ) con el tratamiento de microondas. En línea con lo comentado anteriormente para el contenido en fenoles totales, la muestra MW600\_6 exhibió el mayor aumento en el contenido de flavonoides, mientras que las muestras MW300\_2 y MW300\_4 experimentaron una disminución en el mismo. En el estudio con brócoli mencionado anteriormente, el tiempo de exposición resultó ser significativo y se observó un aumento lineal mediante el aumento de la potencia y del tiempo de exposición hasta los 175 W y 15,93 min que se consideraron como condiciones óptimas (Jokić et al., 2012). En otro estudio con achicoria se observó un aumento progresivo en el contenido de quercetina-3-O-rutinósido con la duración del tratamiento de microondas hasta alcanzar un máximo al cabo de 30 min (Zeb et al., 2019).



**Figura 10.** A) Contenido de fenoles totales expresados en mg de ácido gálico equivalentes (EAG) por g de materia seca en las muestras pretratadas con microondas. B) Contenido de flavonoides totales expresados en mg de quercetina equivalentes (EQ) por g de materia seca en las muestras pretratadas. C) Capacidad antioxidante medida por el método DPPH expresada en mg de trólox equivalentes (ET) por g de materia seca en las muestras pretratadas. D) Capacidad antioxidante medida por el método ABTS expresada en mg de trólox equivalentes (ET) por g de materia seca en las muestras pretratadas. MW300\_2: muestra expuesta durante 2 min a una potencia de 300 W de microondas; MW300\_4: muestra expuesta durante 4 min a una potencia de 300 W de microondas; MW300\_6: muestra expuesta durante 6 min a una potencia de 300 W de microondas; MW600\_2: muestra expuesta durante 2 min a una potencia de 600 W de microondas; MW600\_4: muestra expuesta durante 4 min a una potencia de 300 W; MW600\_6: muestra expuesta durante 6 min a una potencia de 300 W; MW\_C: muestra control. <sup>a,b,c...</sup>letras diferentes para un mismo compuesto indican diferencias estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95%.

En el caso de la actividad antioxidante medida por el método del radical DPPH, se observó un aumento considerable con respecto de la muestra control en todas las condiciones ensayadas, a excepción de los tratamientos MW300\_2 y MW600\_6, donde la actividad antirradical disminuyó o se mantuvo constante, respectivamente. Resultados similares se obtuvieron en un estudio con cáscara de nuez, donde se extrajeron menos compuestos fenólicos cuando se aplicaban microondas durante un período corto de 20 min o prolongado de 45 min, afectando así a la capacidad antioxidante (Rodríguez-Padrón et al., 2020). Por otro lado, una potencia más elevada resultó, de forma general, en un aumento en la capacidad antioxidante, lo que también se observó en un estudio con vainas de algarroba, donde a una mayor temperatura mejoró la capacidad antioxidante. Y es que una temperatura alta podría acelerar las interacciones intermoleculares, aumentando la solubilidad de distintos compuestos de la muestra (Quiles-Carrillo et al., 2019).

En cuanto a la actividad antioxidante medida por el método del radical ABTS, el tratamiento con microondas no afectó o disminuyó significativamente su valor ( $p$ -valor < 0,05). De todas las muestras analizadas, la muestra tratada durante 2 min mostró, con independencia de la potencia aplicada (MW300\_2 y MW600\_2), una mayor capacidad para secuestrar el radical ABTS. Esto puede deberse a la degradación de ciertos compuestos antioxidantes por la alta temperatura a la que se expusieron las otras muestras.

Los valores de la capacidad antioxidante analizados por el método del radical ABTS fueron relativamente más altos que los obtenidos por el método del radical DPPH, como también se informó en un estudio sobre hojas de *Moringa oleifera* tratadas con microondas (Albarri & Şahin, 2024). Esto puede explicarse teniendo en cuenta que el método del radical ABTS es capaz de detectar tanto antioxidantes hidrofóbicos como hidrofílicos (Martysiak-Żurowska & Wenta, 2012).

Después del estudio de las diferentes combinaciones de potencia y duración de microondas, se pudo concluir que las condiciones que resultan en un producto con mejores propiedades antioxidantes fueron una potencia de 3W/g durante 4 ó 6 min de tratamiento, seleccionándose para posteriormente obtener los polvos pretratados.

### 4.3. EFECTO DEL PROCESADO SOBRE LAS PROPIEDADES DE LOS PRODUCTOS EN POLVO

#### 4.3.1. EFECTO SOBRE LAS PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS DEL POLVO

En la **Tabla 5** se muestran los valores de actividad del agua ( $a_w$ ), humedad ( $x_w$ ) y contenido de sólidos solubles ( $x_{ss}$ ) correspondientes al residuo de zanahoria y a cada uno de los polvos obtenidos a partir del mismo pretratado y sin pretratar y secado con aire a 60 °C durante 10 h.

**Tabla 4.** Propiedades físicoquímicas del residuo de zanahoria y de los polvos de residuo de zanahoria previamente pretratada. Media  $\pm$  desviación estándar de tres repeticiones. SP NO SAC: muestra sin deshidratar ni pretratar; SAC60\_SP: secado por aire caliente a 60°C 10 h sin pretratar; SAC60\_AUTO: secado por aire caliente a 60°C 10 h de la muestra pretratada por autoclave; SAC60\_US: secado por aire caliente a

60°C 10 h de la muestra pretratada por ultrasonidos; FSAC60\_24: secado por aire caliente a 60°C 10 h de la muestra fermentada 24 h; SAC60\_MW: secado por aire caliente a 60°C 10 h de la muestra pretratada por microondas.

Muestra	% Humedad ( $x_w$ )	$a_w$	$x_{ss}$ (g <sub>ss</sub> /g <sub>total</sub> )
SPNO SAC	87,89 ± 0,08 <sup>d</sup>	0,9929 ± 0,0013 <sup>b</sup>	0,998 ± 0,013 <sup>c</sup>
SAC60_SP	8,09 ± 2,09 <sup>bc</sup>	0,27 ± 0,02 <sup>a</sup>	0,628 ± 0,008 <sup>b</sup>
SAC60_AUTO	4,24 ± 3,66 <sup>a</sup>	0,36 ± 0,09 <sup>a</sup>	0,779 ± 0,009 <sup>d</sup>
SAC60_US	8,00 ± 1,79 <sup>bc</sup>	0,33 ± 0,07 <sup>a</sup>	0,5305 ± 0,0009 <sup>a</sup>
FSAC60_24	9,177 ± 0,914 <sup>c</sup>	0,301 ± 0,010 <sup>a</sup>	0,64 ± 0,02 <sup>bc</sup>
SAC60_MW	5,4 ± 0,4 <sup>ab</sup>	0,35 ± 0,09 <sup>a</sup>	0,6607 ± 0,0063 <sup>c</sup>

<sup>a,b,c</sup>...letras diferentes en la misma columna indican diferencias estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95%.

Los resultados relacionados con los valores de la  $a_w$  de los diferentes polvos indicaron que el secado por aire caliente a 60 °C produjo una reducción significativa ( $p$ -valor < 0,05) en comparación con la muestra control fresca. Además, las diferencias observadas entre los polvos sometidos a distintos pretratamientos no fueron significativas ( $p$ -valor > 0,05). La muestra control fresca presentó el valor de  $a_w$  más elevado, indicando su alto riesgo de degradación y su carácter perecedero (Bas-Bellver et al., 2020), en parte debido a la mayor probabilidad de aparición de vida microbiana (Zalewska et al., 2022). En contraste, los valores de  $a_w$  de los polvos obtenidos tras el secado se situaron en el intervalo de 0,27-0,35, lo cual alarga su vida útil, reduce el riesgo de deterioro y promueve la estabilidad del producto. Aunque el objetivo inicial del estudio era obtener valores de  $a_w$  inferiores a 0,3, esto solo se logró en el polvo obtenido a partir de residuo de zanahoria sin pretratar. No obstante, los valores obtenidos se encuentran dentro del intervalo 0.2-0.4 recomendado por algunos autores (Vesterlund et al., 2012).

La humedad del residuo de zanahoria también disminuyó considerablemente tras el secado con aire a 60 °C. En este caso, sí que se aprecian diferencias estadísticamente significativas dependiendo del pretratamiento aplicado. Destaca el valor de humedad del polvo obtenido a partir de la muestra fermentada ya que resultó en un valor significativamente más elevado en comparación con los demás pretratamientos, indicando que este pretratamiento supuso un secado menos eficiente. De forma similar, en los polvos obtenidos a partir de tallos de brócoli mediante secado por aire caliente, se observó que los valores de  $x_w$  y de  $a_w$  de los polvos procedentes de residuo fermentado eran superiores a los de los demás polvos (Paredes, 2023). Esto podría ser por el encostramiento durante las etapas iniciales del secado, cuando la velocidad de secado es más elevada, limitando la difusión de agua a través del tejido, resultando en un producto con una humedad más elevada (Maskan, 2001; Bas-Bellver et al., 2023c). Sin embargo, esta mayor humedad no se traduce en una mayor  $a_w$ , indicando que el microorganismo contribuye a ligar el agua presente en el producto, modificando sus propiedades de interacción con el agua.

El polvo pretratado con autoclave presentó el menor contenido de humedad ( $p$ -valor < 0,05). Este resultado sugiere que la aplicación de altas temperaturas previamente al secado a modo de pretratamiento, como tuvo lugar durante el autoclavado (120 °C durante 2 h), tiene un mayor efecto en la reducción del contenido de humedad durante el posterior secado por aire caliente a 60 °C. Debido a la aplicación de altas temperaturas es probable que se desnaturalicen proteínas y se degraden distintos compuestos de la pared celular, aumentando así la permeabilidad de paredes y membranas celulares, facilitando la transferencia de agua a través del lecho, obteniéndose un polvo con un menor contenido de humedad tras el secado.

Por último, se observa una disminución estadísticamente significativa en el contenido de sólidos solubles de los polvos pretratados con respecto al residuo de zanahoria fresca sin pretratar ( $p$ -valor < 0,05). El contenido de sólidos solubles ha sido superior en los polvos pretratados mediante autoclave y microondas, y destaca el polvo pretratado mediante ultrasonidos ya que presenta el valor más bajo en cuanto al contenido de sólidos solubles. En el estudio de zanahorias secas y pretratadas por ultrasonidos se observó que, si se aplicaba 60 °C y ultrasonidos durante 40 min, se reducían los °Brix respecto a los 20 min (Polat et al., 2022). En otro estudio con setas tratadas mediante

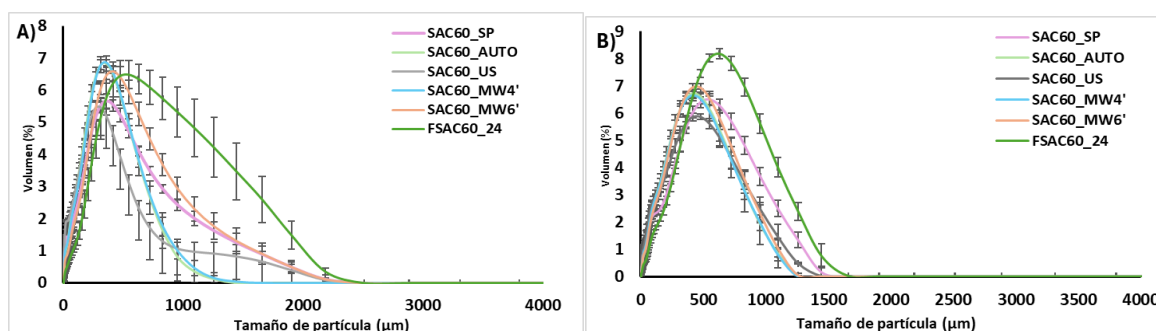
ultrasonidos se observó un aumento en el contenido de sólidos solubles, pero se produjo una reducción en cuanto al contenido de agua debido a la formación de canales microscópicos por la aplicación de ultrasonidos provocando la migración del agua del interior de la célula al medio exterior hipertónico, lo que podría provocar que se concentren diversos compuestos (Fei et al., 2017).

El polvo pretratado mediante autoclave mostró un aumento significativo en el contenido de sólidos solubles comparado con el polvo sin pretratar ( $p$ -valor < 0,05). En el caso del almidón de batata morada, el tratamiento combinado de autoclave y desramificación con pululanasa disminuyó el tamaño molecular del almidón, incrementando la solubilidad de los sólidos en agua (Bodjrenou et al., 2022). Un estudio similar con frijoles secos demostró que la temperatura alta solubilizaba más el almidón (Li & Zhao, 1997). En zanahorias, que tienen poco almidón, este aumento podría deberse a la solubilización de hemicelulosa y la despolimerización de celulosa.

#### 4.3.2. TAMAÑO DE PARTÍCULA

El tamaño de partícula del polvo adquiere relevancia debido a que puede repercutir en diversas propiedades fisicoquímicas y funcionales del producto final. Por ejemplo, el tamaño de partícula puede modificarla estabilidad del producto, puede modificar sus propiedades organolépticas, o puede contribuir a una mayor bioaccesibilidad de nutrientes o la vida útil del producto (Kaur et al., 2023). Se ha comprobado que el tamaño de partícula está relacionado con las propiedades tecnológicas del polvo, tales como las propiedades de interacción con el agua o con el aceite (Bas-Bellver et al., 2023a) El análisis del tamaño de partícula se realizó tanto por vía seca como por vía húmeda para cada uno de los polvos obtenidos a partir del residuo de zanahoria.

En la **Figura 11** se muestran las curvas de distribución del tamaño de partículas obtenidas para cada polvo pretratado mediante vía seca o vía húmeda. El volumen de partículas (%) se ve representado por estas curvas de distribución que tiene un tamaño determinado. Una curva de distribución que presenta una mayor amplitud o mayor *span* indicaría una mayor variabilidad dentro de una muestra en cuanto al tamaño de las partículas que la componen. En cambio, una curva de distribución más estrecha indicaría una menor variabilidad dentro de una muestra en cuanto al tamaño de las partículas, constituyendo así una muestra más homogénea.



**Figura 8.** Distribución del tamaño de partícula (D [4,3]). A) Vía seca. B) Vía húmeda. SAC60\_SP: secado por aire caliente a 60°C 10 h sin pretratar; SAC60\_AUTO: secado por aire caliente a 60°C 10 h de la muestra pretratada por autoclave; SAC60\_US: secado por aire caliente a 60°C 10 h de la muestra pretratada por ultrasonidos; SAC60\_MW4': secado por aire caliente a 60°C 10 h de la muestra pretratada por microondas durante 4 min. SAC60\_MW6': secado por aire caliente a 60°C 10 h de la muestra pretratada por microondas durante 6 min. FSAC60\_24: secado por aire caliente a 60°C 10 h de la muestra fermentada 24 h

En la curva de distribución correspondiente al análisis por vía seca se pueden apreciar algunas diferencias entre FSAC60\_24 y el resto de los polvos pretratados, ya que presenta una mayor amplitud, evidenciando una mayor heterogeneidad del tamaño de partículas. A su vez, es el polvo que resulta ser el de mayor tamaño de partícula, en torno a 500 µm. En un estudio de un producto lácteo fermentado se determinó que el tamaño de partícula de los polvos resultantes dependía de diversos factores como las condiciones de fermentación, el tratamiento mecánico y el contenido de diversos compuestos que produce una mayor amplitud, dispersión o menor homogeneidad en las partículas de los polvos (Heck et al., 2023). Por otra parte, se ha observado que un valor de humedad

más elevado de lo habitual puede tener un efecto negativo durante la molienda, reduciendo la fragilidad del material y aumentando su plasticidad o ductilidad. Esto se traduce en un mayor consumo de energía durante la molienda (Jung et al., 2018). Este hallazgo concuerda con el contenido de humedad más elevado registrado en la muestra FSAC60\_24 (apartado 4.8.1), requiriendo así mayor tiempo de molienda. A su vez, la presencia de algunos microorganismos podría provocar el aumento del tamaño de partícula o, debido a que son capaces de formar agregados, dar lugar a un mayor span. En cambio, como se puede apreciar, los polvos restantes presentan una distribución bastante similar y la mayoría de sus partículas tienen un tamaño aproximado de 400  $\mu\text{m}$ .

En el caso de las curvas de distribución correspondientes a la vía húmeda se aprecia que todos los polvos pretratados obtenidos presentan una distribución de tamaño de partícula similar, pero se puede apreciar una ligera diferencia en FSAC60\_24 porque vuelve a ser menos homogéneo que el resto. De forma general, se observa una disminución en el tamaño de partícula de todos los polvos pretratados cuando este es analizado por la vía húmeda respecto al análisis a través de vía seca.

Con el fin de determinar si existen diferencias estadísticamente significativas en cuanto al tamaño de partícula, En la **Tabla 6** se presentan los valores resultantes de los parámetros característicos D[4,3], D[3,2],  $d_{10}$ ,  $d_{50}$  y  $d_{90}$  para vía seca y húmeda. Según estos resultados, puede afirmarse que existen diferencias estadísticamente significativas ( $p$ -valor < 0,05) entre las partículas. En general, los resultados confirman las observaciones realizadas sobre las curvas, obteniéndose diferencias estadísticamente significativas entre las distintas muestras a través de las dos vías, y evidenciándose una clara diferencia de FSAC60\_24 con respecto al resto. Por otro lado, el polvo obtenido tras un pretratamiento por US fue el que dio lugar a un tamaño de partícula menor. Un resultado similar se dio en el estudio de proteína de suero en polvo al aplicar una frecuencia de 20 kHz (Zisu et al., 2011).

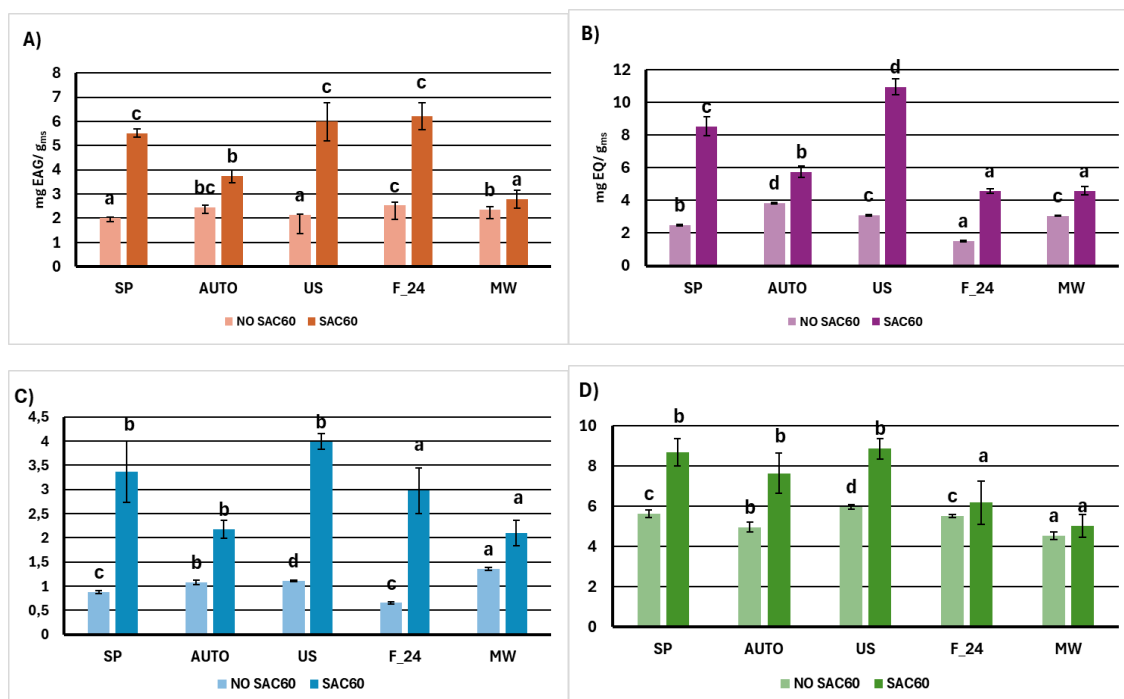
**Tabla 5.** Parámetros característicos del tamaño de partícula obtenidos por vía seca y húmeda. Media  $\pm$  desviación estándar de cinco y diez repeticiones de vía seca y húmeda, respectivamente. SAC60\_SP: secado por aire caliente a 60°C 10 h sin pretratar; SAC60\_AUTO: secado por aire caliente a 60°C 10 h de la muestra pretratada por autoclave; SAC60\_US: secado por aire caliente a 60°C 10 h de la muestra pretratada por ultrasonidos; SAC60\_MW4': secado por aire caliente a 60°C 10 h de la muestra pretratada por microondas durante 4 min. SAC60\_MW6': secado por aire caliente a 60°C 10 h de la muestra pretratada por microondas durante 6 min. FSAC60\_24: secado por aire caliente a 60°C 10 h de la muestra fermentada 24 h

VÍA SECA	D [4, 3]	D [3, 2]	$d_{10}$	$d_{50}$	$d_{90}$
SAC60_SP	346 $\pm$ 18 <sup>b</sup>	63,5 $\pm$ 1,7 <sup>b</sup>	22,9 $\pm$ 0,6 <sup>ab</sup>	251 $\pm$ 6 <sup>b</sup>	812 $\pm$ 68 <sup>b</sup>
SAC60_AUTO	260 $\pm$ 18 <sup>a</sup>	75 $\pm$ 3 <sup>c</sup>	32,3 $\pm$ 1,5 <sup>c</sup>	22 $\pm$ 13 <sup>b</sup>	540 $\pm$ 40 <sup>a</sup>
SAC60_US	253 $\pm$ 18 <sup>a</sup>	46,0 $\pm$ 1,2 <sup>a</sup>	18,4 $\pm$ 0,3 <sup>a</sup>	172 $\pm$ 6 <sup>a</sup>	565 $\pm$ 48 <sup>a</sup>
SAC60_MW4'	264 $\pm$ 11 <sup>a</sup>	66,6 $\pm$ 1,5 <sup>bc</sup>	27,1 $\pm$ 0,9 <sup>bc</sup>	226 $\pm$ 6 <sup>b</sup>	550 $\pm$ 25 <sup>a</sup>
SAC60_MW6'	386 $\pm$ 23 <sup>c</sup>	92 $\pm$ 3 <sup>d</sup>	44 $\pm$ 3 <sup>d</sup>	307 $\pm$ 14 <sup>c</sup>	828 $\pm$ 73 <sup>b</sup>
FSAC60_24	553 $\pm$ 53 <sup>d</sup>	176 $\pm$ 14 <sup>e</sup>	99 $\pm$ 13 <sup>e</sup>	452 $\pm$ 52 <sup>d</sup>	1162 $\pm$ 105 <sup>c</sup>
VÍA HÚMEDA	D [4, 3]	D [3, 2]	$d_{10}$	$d_{50}$	$d_{90}$
SAC60_SP	357 $\pm$ 13 <sup>c</sup>	68,3 $\pm$ 1,5 <sup>b</sup>	30,1 $\pm$ 0,9 <sup>a</sup>	307 $\pm$ 13 <sup>d</sup>	775 $\pm$ 28 <sup>d</sup>
SAC60_AUTO	350 $\pm$ 28 <sup>c</sup>	97 $\pm$ 4 <sup>e</sup>	50 $\pm$ 3 <sup>d</sup>	302 $\pm$ 24 <sup>d</sup>	729 $\pm$ 59 <sup>c</sup>
SAC60_US	303 $\pm$ 15 <sup>a</sup>	64,4 $\pm$ 1,9 <sup>a</sup>	29,5 $\pm$ 0,9 <sup>a</sup>	243 $\pm$ 11 <sup>a</sup>	675 $\pm$ 40 <sup>b</sup>
SAC60_MW4'	301 $\pm$ 10 <sup>a</sup>	76 $\pm$ 2 <sup>c</sup>	37,0 $\pm$ 1,2 <sup>b</sup>	258 $\pm$ 10 <sup>b</sup>	634 $\pm$ 20 <sup>a</sup>
SAC60_MW6'	320 $\pm$ 11 <sup>b</sup>	84 $\pm$ 2 <sup>d</sup>	42,4 $\pm$ 1,4 <sup>c</sup>	281 $\pm$ 11 <sup>c</sup>	660 $\pm$ 23 <sup>ab</sup>
FSAC60_24	460 $\pm$ 17 <sup>d</sup>	128 $\pm$ 6 <sup>f</sup>	78 $\pm$ 4 <sup>e</sup>	427 $\pm$ 16 <sup>e</sup>	886 $\pm$ 29 <sup>e</sup>

<sup>a,b,c</sup>...letras diferentes en la misma columna de la vía húmeda o de la vía seca correspondiente indican diferencias estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95%.

### 4.3.3. PROPIEDADES ANTIOXIDANTES

En este apartado, se presentan las propiedades antioxidantes de los productos en polvo obtenidos tras los procesos que incluyen las operaciones de triturado, pretratamiento, secado por aire caliente y molienda final. Para cada proceso, se determinaron las propiedades antioxidantes del residuo tras el pretratamiento, y las propiedades del producto final, lo que permite comparar la evolución del mismo residuo a lo largo del procesado, según se muestra en la Figura 12.



**Figura 12.** A) Contenido de fenoles totales expresados en mg de ácido gálico equivalentes (EAG) por g de materia seca del residuo de zanahoria pretratado antes y después de secar. B) Contenido de flavonoides totales expresados en mg de quercetina equivalentes (EQ) por g de materia seca del residuo de zanahoria antes y después de secar. C) Capacidad antioxidante medida por el método DPPH expresada en mg de trólox equivalentes (ET) por g de materia seca. D) Capacidad antioxidante medida por el método ABTS expresada en mg de trólox equivalentes (ET) por g de materia seca. SP: muestra control; AUTO: residuo de zanahoria pretratado por autoclave; US: residuo de zanahoria pretratado por ultrasonidos; F\_24: residuo de zanahoria fermentado; MW: residuo de zanahoria pretratado por microondas. SAC: secado por aire caliente a 60°C; NO SAC: residuo de zanahoria sin secar. <sup>a,b,c...</sup>letras diferentes en la misma serie indican diferencias estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95%.

En cuanto al contenido de fenoles totales (**Figura 12A**), tal y como se ha observado en el estudio previo, se confirma que los pretratamientos propuestos incrementan el contenido en fenoles totales del residuo pretratado, la cual resulta estadísticamente significativa ( $p < 0,05$ ) en el caso del residuo autoclavado, el residuo fermentado y el residuo pretratado con microondas. Sin embargo, esta mejora inicialmente obtenida no siempre se traduce en productos en polvo con un mayor contenido en fenoles, de modo que solamente las muestras pretratadas con US y fermentadas consiguen mantener esa mejora en el producto tras su deshidratación, con respecto al producto en polvo sin pretratar. Un estudio sobre cáscaras de granada determinó un aumento en el contenido de fenoles después del secado si previamente se aplicaba un tratamiento con ultrasonidos debido a la capacidad de inducir la cavitación, liberando así más compuestos fenólicos (Niveditha et al., 2023). Estas diferencias en cuanto al efecto del secado en función del pretratamiento aplicado podrían deberse a la mayor susceptibilidad de los compuestos fenólicos liberados durante el pretratamiento, como el autoclavado y microondas. Otros autores (Peleg et al., 1991; Randhir et al., 2008) hacen referencia a la exposición de compuestos debido a la liberación de compuestos fenólicos unidos covalentemente a polisacáridos de la pared celular o acumulados en las vacuolas a las altas temperaturas y al oxígeno del aire,

responsables de su mayor deterioro durante el secado. Por otro lado, al ser estos pretratamientos los que suponen un mayor efecto térmico sobre el residuo, sugiere que podría existir cierta degradación térmica de compuestos que luego pueden dar lugar a formar reactivas, como por ejemplo los azúcares que darían lugar a productos de Maillard. El ANOVA multifactorial confirmó que la interacción entre los factores pretratamiento y secado resultó estadísticamente significativa

En lo concerniente al contenido de flavonoides totales (**Figura 12B**) de los polvos, existen diferencias estadísticamente significativas ( $p$ -valor  $< 0,05$ ) entre las distintas muestras. En primer lugar, se puede observar que la muestra pretratada por ultrasonidos y secada por aire caliente a  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  es la única que presenta un contenido de flavonoides totales superior al del polvo obtenido a partir del residuo de zanahoria sin pretratar. El tratamiento con ultrasonidos ha mostrado ser efectivo en la mejora de la biosíntesis de compuestos fenólicos y flavonoides en diversos estudios. Existen estudios previos que destacan el efecto positivo de los US sobre cambios que se producirán posteriormente, durante el almacenamiento o el secado, por ejemplo. En ciruelas, se ha demostrado cómo los US fueron capaces de inhibir de forma significativa la pérdida de flavonoides durante el almacenamiento (Chen & Zhu, 2011). Por otro lado, el fenómeno de cavitación previamente discutido, que induce induciendo la ruptura de las paredes celulares y membranas facilitando así la liberación de compuestos fenólicos preexistentes, también aumenta la difusividad del agua dentro del material vegetal, lo que puede resultar en una menor degradación térmica de los compuestos sensibles a elevadas temperaturas durante el secado por aire caliente (Ercan & Soysal, 2013; Wang et al., 2019), debido a la prolongación del periodo de secado constante en el que el secado está más cerca de ser adiabático. En otro estudio se observó que el pretratamiento con ultrasonidos de rodajas de piña en agua destilada y jugo de piña preservó respectivamente el 80,3% y 93,6% de ácido ascórbico, un compuesto que comparte ciertas características con compuestos flavonoides, después del secado convectivo a  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , en contraposición a, las muestras control (sin tratar con US), que solo retuvieron el 57,5% del ácido ascórbico inicial (Rodríguez et al., 2017).

En cuanto al resto de pretratamientos, a pesar de mejorar el contenido en flavonoides con respecto a la muestra antes del secado, la mejora es significativamente menor y no lleva a alcanzar los valores de la muestra sin pretratar. La reducción en el contenido de flavonoides totales ya resultó evidente al comparar los residuos de zanahoria fermentados y no pretratados sin deshidratar (Figura 12B). En un estudio previo sobre el efecto del secado sobre té fermentado y sin fermentar, también se observó que el té sin fermentar tenía un contenido de flavonoides significativamente más alto que el té fermentado (Rabeta & Lai, 2013). En cambio, en otro estudio de polvos obtenidos a partir de brócoli fermentado dio como resultado el aumento en el contenido de fenoles y flavonoides después de aplicar secado (Bas-Bellver et al., 2023c) lo que corrobora nuestro resultado obtenido.

Los resultados obtenidos sugieren que la liberación de los flavonoides de las células conseguida gracias a algunos pretratamientos los hace más vulnerables a las altas temperaturas empleadas durante el secado convectivo (Huang et al., 2019; Czurzyńska & Lenart, 2011), como suponen los pretratamientos de microondas y autoclave.

Por lo que respecta a la capacidad antioxidante, (**Figura 12C y D**) se observaron diferencias estadísticamente significativas para ambos métodos y entre las distintas muestras ( $p$ -valor  $< 0,05$ ). En cuanto a la capacidad antioxidante medida por el método DPPH, nuevamente las muestras que se ven más beneficiadas después del secado son las US y F\_24. El polvo US es el que ha experimentado un ligero aumento no significativo ( $p$ -valor  $> 0,05$ ) con respecto a la capacidad antioxidante de la muestra control (SP), lo que no permite afirmar que el secado haya provocado el aumento de la capacidad antioxidante medida por el método DPPH después de haber aplicado ultrasonidos. Por último, la actividad antioxidante medida por el método ABTS muestra menores diferencias entre las muestras deshidratadas y sin deshidratar que la misma medida mediante el método DPPH. Además, los valores obtenidos por el método ABTS resultaron significativamente mayores a los obtenidos por el método DPPH, lo que es sugestivo de la variabilidad de los métodos de determinación de capacidad antioxidante. Como se puede observar, el polvo US es el que presenta mejores resultados, pero no se puede afirmar que esa diferencia sea significativa. Algunos estudios obtuvieron una mejora en la actividad antioxidante medida por DPPH al tratar durante 10 min bajo ultrasonidos y secar a  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$



las cáscaras de granada (Niveditha et al., 2023) y que, con un alto contenido de fenoles, se produjo un aumento en la capacidad antioxidante lo cual se puede observar también en nuestro caso. Esto pudo deberse a la mayor capacidad para donar átomos de hidrógeno. En cuanto al polvo procedente del residuo fermentado, no se obtuvieron muchas diferencias en los valores de actividad antioxidante según el método ABTS después de aplicar secado. En un estudio de fermentación de puré de brócoli, el contenido de fenoles aumentó notablemente, pero la capacidad antioxidante lo hizo en menor medida (Cai et al., 2019). Una posible explicación del aumento fenólico podría ser que las enzimas microbianas degradan los polisacáridos de la pared celular, favoreciendo la liberación de compuestos fenólicos (Sharma et al., 2020; Gulsunoglu et al., 2020), así como la producción de nuevos compuestos antioxidantes por parte de los microorganismos (Bei et al., 2017) y la transformación de algunos compuestos antioxidantes en otros de mayor actividad (Sharma et al., 2020), incrementando así la capacidad antioxidante, pero en menor medida.

Nuevamente los polvos obtenidos a partir del residuo de zanahoria pretratado con microondas o autoclavado obtuvieron los valores en mg de trolox equivalente por g de materia seca más bajos, por debajo incluso del polvo control, pese a que estos residuos presentaban antes de la deshidratación una capacidad de secuestrar el radical DPPH superior al del residuo de zanahoria sin pretratar.

Comparando los valores de las propiedades antioxidantes obtenidos, se observa un aumento en todas ellas, en mayor o menor medida dependiendo de la propiedad considerada y del pretratamiento en cuestión. Esto confirma que el secado por aire caliente es una técnica de deshidratación que favorece la mejora en las propiedades antioxidantes. Esto puede ser debido a las reacciones de Maillard que, favorecidas por el uso de altas temperaturas durante el secado, permiten la formación de nuevas sustancias fenólicas (Bernaert et al., 2013). Además, el empleo de una temperatura de secado moderada puede inducir la inactivación de ciertas enzimas que degradan compuestos fenólicos (Miletic et al., 2013), viendo el aumento en contenido de fenoles y flavonoides, tanto para col blanca como para brócoli (Bas-Bellver et al., 2022)

## 5. CONCLUSIONES.

Los diferentes polvos pretratados obtenidos a partir del residuo de zanahoria han presentado mejoras significativas en cuanto a las distintas propiedades funcionales, a su vez, el trabajo ha permitido definir, para cada uno de los pretratamientos ensayados, las condiciones que resultan en un producto con mejores propiedades antioxidantes.

- A partir del estudio previo de secado por aire caliente se seleccionó la temperatura de 60 °C aplicada durante 10 h, en el caso del residuo de zanahoria sin pretratar, y durante 7 h, en el caso del residuo fermentado.
- A partir del estudio de fermentación se seleccionó la cepa de *Lactobacillus salivarius* durante 24 h ya que, además de garantizar mayores recuentos, resultaba en un contenido de fenoles totales más elevado.
- A partir del estudio preliminar con ultrasonidos se dedujo que las mejores propiedades antioxidantes se obtenían al tratar 100 g de residuo con 40 kHz durante 15 min.
- A partir del estudio preliminar con microondas se pudo seleccionar el tratamiento a 3 W/g durante 4 ó 6 min.

Por otra parte, en cuanto a los polvos secados por aire caliente se ha obtenido un incremento general en todas las propiedades antioxidantes con respecto a la muestra pretratada fresca. En cambio, se observó reducciones en propiedades antioxidantes para el residuo pretratado por autoclave y microondas, mientras que los pretratamientos con ultrasonidos y fermentación han mostrado un incremento en propiedades antioxidantes, que se han visto más favorecidas tras el secado por aire caliente.

Se concluye que los polvos obtenidos a partir de residuos de zanahoria son una alternativa interesante para la reincorporación de estos residuos a la cadena alimentaria y que las propiedades funcionales pueden verse mejoradas por la aplicación de distintos tratamientos biológicos o termofísicos previos al secado, permitiendo así múltiples aplicaciones en la elaboración de alimentos, y que podrían ser incluidos en distintas matrices alimentarias.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- ‘Aqilah, N. M. N., Rovina, K., Felicia, W. X. L., & Vonnice, J. M. (2023). A Review on the Potential Bioactive Components in Fruits and Vegetable Wastes as Value-Added Products in the Food Industry. In *Molecules* (Vol. 28, Issue 6). MDPI.
- Vega-Gálvez, K. Di Scala, K. Rodríguez, R. Lemus-Mondaca, M. Miranda, J. Lopez, M. Perez-Won. Effect of air-drying temperature on physico-chemical properties, antioxidant capacity, colour and total phenolic content of red pepper (*Capsicum annum*, L. var. Hungarian). *Food Chem.*, 117 (4) (2009), pp. 647-653
- A., A., Abdullah, N., Zulkifli, I., Soleimani, A. F., Liang, J. B., & Oskoueian, E. (2014). Lactobacillus salivarius Fermentation Reduced Glucosinolate and Fibre in Canola Meal. *Journal of Food Research*, 3(5), 95.
- Aadil, R. M., Zeng, X.-A., Han, Z., & Sun, D.-W. (2013). Effects of ultrasound treatments on quality of grapefruit juice. *Food Chemistry*, 141(3), 3201-3206.
- Adetuyi, F. O., & Ibrahim, T. A. (2014). Effect of Fermentation Time on the Phenolic, Flavonoid and Vitamin C Contents and Antioxidant Activities of Okra (*Abelmoschus esculentus*) Seeds. *Nigerian Food Journal*, 32(2), 128-137.
- Alasalvar, C., Grigor, J. M., Zhang, D., Quantick, P. C., & Shahidi, F. (2001). Comparison of Volatiles, Phenolics, Sugars, Antioxidant Vitamins, and Sensory Quality of Different Colored Carrot Varieties. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49(3), 1410-1416.
- Albarri, R., & Şahin, S. (2024). Monitoring the recovery of bioactive molecules from Moringa oleifera leaves: Microwave treatment vs ultrasound treatment. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(1), 1059-1071.
- Al-Snafi, P. D. A. E. (2017). Nutritional and therapeutic importance of *Daucus carota*- A review. *IOSR Journal of Pharmacy (IOSRPHR)*, 07(02), 72-88.
- Amaya-Cruz, D.M.; Rodríguez-González, S.; Pérez-Ramírez, I.F.; Loarca-Piña, G.; Amaya-Llano, S.; Gallegos-Corona, M.A.; Reynoso-Camacho, R. Juice by-products as a source of dietary fibre and antioxidants and their effect on hepatic steatosis. *J. Funct. Foods* 2015, 17, 93–102.
- Annegowda, H. V., Anwar, L. N., Mordí, M. N., Ramanathan, S., & Mansor, S. M. (2010). Influence of sonication on the phenolic content and antioxidant activity of *Terminalia catappa* L. leaves. *Pharmacognosy Research*, 2(6), 368-373.
- Araujo, R. G., Rodríguez-Jasso, R. M., Ruíz, H. A., Govea-Salas, M., Pintado, M., & Aguilar, C. N. (2021). Recovery of bioactive components from avocado peels using microwave-assisted extraction. *Food and Bioproducts Processing*, 127, 152-161.
- Arscott, S. A., & Tanumihardjo, S. A. (2010). Carrots of Many Colors Provide Basic Nutrition and Bioavailable Phytochemicals Acting as a Functional Food. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 9(2), 223-239.
- Arvanitoyannis, I.S.; Kotsanopoulos, K.V.; Savva, A.G. Use of ultrasounds in the food industry—Methods and effects on quality, safety, and organoleptic characteristics of foods: A review. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 2017, 57, 109–128.
- Aspri, M., Papademas, P., & Tsaltas, D. (2020). Review on Non-Dairy Probiotics and Their Use in Non-Dairy Based Products. *Fermentation*, 6(1), Article 1.
- Bao, B., & Chang, K. c. (1994). Carrot Pulp Chemical Composition, Color, and Water-holding Capacity as Affected by Blanching. *Journal of Food Science*, 59(6), 1159-1161.
- Baranski, R. (2008). *Genetic transformation of carrot (Daucus carota) and other apiaceae species Transgenic Plant Journal Genetic Transformation of Carrot (Daucus carota) and Other Apiaceae Species.*
- Bas-Bellver, C., Barrera, C., Betoret, N., & Seguí, L. (2020). Turning agri-food cooperative vegetable residues into functional powdered ingredients for the food industry. *Sustainability (Switzerland)*, 12(4).
- Bas-Bellver, C., Barrera, C., Betoret, N., & Seguí, L. (2022). Impact of Disruption and Drying Conditions on Physicochemical, Functional and Antioxidant Properties of Powdered Ingredients Obtained from Brassica Vegetable By-Products. *Foods*, 11(22).
- Bas-Bellver, C., Barrera, C., Betoret, N., & Seguí, L. (2023b). Effect of Processing and In Vitro Digestion on Bioactive Constituents of Powdered IV Range Carrot (*Daucus carota*, L.) Wastes. *Foods*, 12(4).
- Bas-Bellver, C.; Barrera, C.; Betoret, N.; Seguí, L. Impact of Fermentation Pretreatment on Drying Behaviour and Antioxidant Attributes of Broccoli Waste Powdered Ingredients. *Foods* 2023c, 12, 3526.
- Bas-Bellver, C.; Barrera, C.; Betoret, N.; Seguí, L. Physicochemical, Technological and Functional Properties of Upcycled Vegetable Waste Ingredients as Affected by Processing and Storage. *Plant Foods Hum. Nutr.* 2023a, 78, 710–719.

- Bei, Q., Liu, Y., Wang, L., Chen, G., & Wu, Z. (2017). Improving free, conjugated, and bound phenolic fractions in fermented oats (*Avena sativa* L.) with *Monascus anka* and their antioxidant activity. *Journal of Functional Foods*, 32, 185-194.
- Bernaert, N., Wouters, D., De Vuyst, L., De Paepe, D., De Clercq, H., Van Bockstaele, E., De Loose, M., & Van Droogenbroeck, B. (2013). Antioxidant changes of leek (*Allium ampeloprasum* var. *Porrum*) during spontaneous fermentation of the white shaft and green leaves. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 93(9), 2146-2153.
- Betoret, E., Betoret, N., Calabuig-Jiménez, L., Barrera, C., & Dalla Rosa, M. (2020). Effect of Drying Process, Encapsulation, and Storage on the Survival Rates and Gastrointestinal Resistance of *L. salivarius* spp. *Salivarius* Included into a Fruit Matrix. *Microorganisms*, 8(5), Article 5.
- Block, G. (1994). Nutrient Sources of Provitamin A Carotenoids in the American Diet. *American Journal of Epidemiology*, 139(3), 290-293.
- Bodjrenou, D. M., Li, X., Chen, W., Zhang, Y., Zheng, B., & Zeng, H. (2022). Effect of Pullulanase Debranching Time Combined with Autoclaving on the Structural, Physicochemical Properties, and In Vitro Digestibility of Purple Sweet Potato Starch. *Foods*, 11(23).
- Cai, Y. X., Wang, J. H., McAuley, C., Augustin, M. A., & Terefe, N. S. (2019). Fermentation for enhancing the bioconversion of glucoraphanin into sulforaphane and improve the functional attributes of broccoli puree. *Journal of Functional Foods*, 61, 103461.
- Calín-Sánchez, Á.; Lipan, L.; Cano-Lamadrid, M.; Kharaghani, A.; Masztalerz, K.; Carbonell-Barrachina, Á.A.; Figiel, A. Comparison of Traditional and Novel Drying Techniques and Its Effect on Quality of Fruits, Vegetables and Aromatic Herbs. *Foods* 2020, 9, 1261.
- Carrera, C., Ruiz-Rodríguez, A., Palma, M., & Barroso, C. G. (2012). Ultrasound assisted extraction of phenolic compounds from grapes. *Analytica Chimica Acta*, 732, 100–104.
- Cerezuela, R., Guardiola, F. A., Meseguer, J., and Esteban, M. Á. (2012). Increases in immune parameters by inulin and *Bacillus subtilis* dietary administration to gilthead seabream (*Sparus aurata* L.) did not correlate with disease resistance to *Photobacterium damsela*. *Fish. Shellfish. Immu.* 32, 1032–1040. doi: 10.1016/j.fsi.2012.02.025
- Chan, C.-H., Yeoh, H. K., Yusoff, R., & Ngoh, G. C. (2016). A first-principles model for plant cell rupture in microwave-assisted extraction of bioactive compounds. *Journal of Food Engineering*, 188, 98-107.
- Char, C.D., Carrots (*Daucus corota*, L), Phytochemicals from fruits and vegetables, in: Chemistry and Human Health (Ed. E.M. Yahia), Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., 111 River Street, Hoboken, NJ 07030, USA, pp 969-978, 2018.
- Chen, Z., & Zhu, C. (2011). Combined effects of aqueous chlorine dioxide and ultrasonic treatments on postharvest storage quality of plum fruit (*Prunus salicina* L.). *Postharvest Biology and Technology*, 61(2–3), 117–123.
- Chu, S. C., & Chen, C. (2006). Effects of origins and fermentation time on the antioxidant activities of kombucha. *Food Chemistry*, 98(3), 502–507.
- Ciurzyńska, A., & Lenart, A. (2011). Freeze-Drying—Application in Food Processing and Biotechnology—A Review. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 61(3), 165-171.
- Coman, V.; Teleky, B.E.; Mitrea, L.; Martău, G.A.; Szabo, K.; Călinoiu, L.F.; Vodnar, D.C. Bioactive potential of fruit and vegetable wastes. *Adv. Food Nutr. Res.* 2020, 91, 157–225
- Conesa, C., Seguí, L., Laguarda-Miró, N., & Fito, P. (2016). Microwaves as a pretreatment for enhancing enzymatic hydrolysis of pineapple industrial waste for bioethanol production. *Food and Bioprocess Processing*, 100, 203-213.
- de los Ángeles Fernández, M.; Espino, M.; Gomez, F.J.; Silva, M.F. Novel approaches mediated by tailor-made green solvents for the extraction of phenolic compounds from agro-food industrial by-products. *Food Chem.* 2018, 239, 671–678.
- del Río, P. G., Gullón, B., Pérez-Pérez, A., Romani, A., & Garrote, G. (2021). Microwave hydrothermal processing of the invasive macroalgae *Sargassum muticum* within a green biorefinery scheme. *Bioresource Technology*, 340, 125733.
- Djantou EB, Mboufung CMF, Scher J, Phambu N, Moraël JD (2011) Alternation drying and grinding (ADG) technique: a novel approach for producing ripe mango powder. *LWT-Food Sci Technol* 44(7):1585–1590.
- Doymaz, I., Gorel, O., & Akgun, N. A. (2004). Drying characteristics of the solid by-product of olive oil extraction. *Biosystems Engineering*, 88, 213–219.
- Dreosti, I.E. (1993). *Asia Pacific J Clin Nutr*, 2 (1): 21-5.
- Du, C., Abdullah, J. J., Greetham, D., Fu, D., Yu, M., Ren, L., ... & Lu, D. (2018). Valorization of food waste into biofertiliser and its field application. *Journal of Cleaner Production*, 187, 273-284.

- Ebringerová, A., Hromádková, Z., Alfödi, J., & Hřibalová, V. (1998). The immunologically active xylan from ultrasound-treated corn cobs: Extractability, structure and properties. *Carbohydrate Polymers*, 37(3), 231-239.
- Ergun, M., & Süslüoğlu, Z. (2018). EVALUATING CARROT AS A FUNCTIONAL FOOD. *Middle East Journal of Science*, 4(2), Article 2.
- F. Chemat, H. Zill-e, M.K. Khan. Applications of ultrasound in food technology: processing, preservation and extraction. *Ultrason. Sonochem.*, 18 (2011), pp. 813-835
- Fei, P., Lifu, C., Wenjian, Y., Liyan, Z., Yong, F., Ning, M., & Qihui, H. (2017). Comparison of osmotic dehydration and ultrasound-assisted osmotic dehydration on the state of water, texture, and nutrition of *Agaricus bisporus*. *CyTA - Journal of Food*, 16(1), 181-189.
- FENG, H., & TANG, J. M. (1998). Microwave finish drying of diced apples in a spouted bed. *Journal of Food Science*, 63(4), 679-683.
- Gani, A., Baba, W. N., Ahmad, M., Shah, U., Khan, A. A., Wani, I. A., Masoodi, F. A., & Gani, A. (2016). Effect of ultrasound treatment on physico-chemical, nutraceutical and microbial quality of strawberry. *LWT*, 66, 496-502.
- Gao, W., Chen, F., Wang, X., & Meng, Q. (2020). Recent advances in processing food powders by using superfine grinding techniques: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 19(4), 2222-2255.
- Gopalan C, Ramasastry BV, Balasubramanian SC. *Nutritive value of Indian foods*. Hyderabad: National Institute of Nutrition; 1991. p. 47.
- Gulsunoglu, Z., Purves, R., Karbancioglu-Guler, F., & Kilic-Akyilmaz, M. (2020). Enhancement of phenolic antioxidants in industrial apple waste by fermentation with *Aspergillus* spp. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 25, 101562.
- H.V. Rupasinghe, L.J. Yu. Emerging preservation methods for fruit juices and beverages. Y. El-Samragy (Ed.), *Food additives*, InTech-Open Access Publisher, Rijeka, Croatia (2012), pp. 65-82
- Heck, A., Nöbel, S., & Hinrichs, J. (2023). Inline Particle Size Analysis during Technical-Scale Processing of a Fermented Concentrated Milk Protein-Based Microgel Dispersion: Feasibility as a Process Control. *Dairy*, 4(1), Article 1.
- Hiremath, S., and Pragasam, V. (2022). Oxalobacter formigenes: a new hope as a live biotherapeutic agent in the management of calcium oxalate renal stones. *Anaerobe* 75:102572. doi: 10.1016/j.anaerobe.2022.102572
- Hoz, A. de la, Díaz-Ortiz, Á., & Moreno, A. (2005). Microwaves in organic synthesis. Thermal and non-thermal microwave effects. *Chemical Society Reviews*, 34(2), 164-178.
- Iorizzo, M., Ellison, S., Senalik, D., Zeng, P., Satapoomin, P., Huang, J., Bowman, M., Iovene, M., Sanseverino, W., Cavagnaro, P., Yildiz, M., Macko-Podgórní, A., Moranska, E., Grzebelus, E., Grzebelus, D., Ashrafi, H., Zheng, Z., Cheng, S., Spooner, D., ... Simon, P. (2016). A high-quality carrot genome assembly provides new insights into carotenoid accumulation and asterid genome evolution. *Nature Genetics*, 48(6), 657-666.
- J.A. Larrauri, P. Rupérez, F. Saura-Calixto. Effect of drying temperature on the stability of polyphenols and antioxidant activity of red grape pomace peels. *J. Agric. Food Chem.*, 45 (4) (1997), pp. 1390-1393
- Jabbar, S., Abid, M., Wu, T., Muhammad Hashim, M., Hu, B., Lei, S., ... Zeng, X. (2013). Study on combined effects of blanching and sonication on different quality parameters of carrot juice. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 65(1), 28-33.
- James, A., & Wang, Y. (2019). Characterization, health benefits and applications of fruits and vegetable probiotics. *CyTA - Journal of Food*, 17(1), 770-780.
- Jiménez-Sánchez, C., Lozano-Sánchez, J., Segura-Carretero, A., & Fernández-Gutiérrez, A. (2016). Alternatives to conventional thermal treatments in fruit-juice processing. Part 2: Effect on composition, phytochemical content, and physicochemical, rheological, and organoleptic properties of fruit juices. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(3), 637-652.
- Jokić, S., Cvjetko, M., Božić, Đ., Fabek, S., Toth, N., Vorkapić-Furač, J., & Redovniković, I. R. (2012). Optimisation of microwave-assisted extraction of phenolic compounds from broccoli and its antioxidant activity. *International Journal of Food Science & Technology*, 47(12), 2613-2619.
- Juliá Medina, M. (2017). Caracterización de polvos deshidratados obtenidos a partir de bagazo de arándano y valoración de su utilización como ingrediente funcional.
- Jung, H., Lee, Y. J., & Yoon, W. B. (2018). Effect of Moisture Content on the Grinding Process and Powder Properties in Food: A Review. *Processes*, 6(6), Article 6.
- K.Hobson (2016) Closing the loop or squaring the circle? Locating generative spaces for the circular economy, *Progress in Human Geography*, 40(1), 88-104.

- Kadri, S. M., Zaluski, R., & Orsi, R. de O. (2017). Nutritional and mineral contents of honey extracted by centrifugation and pressed processes. *Food Chemistry*, 218, 237-241.
- Kamdem, A. T. K., & Hardy, J. (1995). Influence of various conditions on meat grinding characteristics. *Journal of Food Engineering*, 25(2), 179-196.
- Kamiloglu, S., Capanoglu, E., Bilen, F. D., Gonzales, G. B., Grootaert, C., Van de Wiele, T., & Van Camp, J. (2016). Bioaccessibility of Polyphenols from Plant-Processing Byproducts of Black Carrot (*Daucus carota* L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 64(12), 2450-2458.
- Karam, M. C., Petit, J., Zimmer, D., Baudelaire Djantou, E., & Scher, J. (2016). Effects of drying and grinding in production of fruit and vegetable powders: A review. *Journal of Food Engineering*, 188, 32-49.
- Kaur, G. J., Orsat, V., & Singh, A. (2023). An overview of different homogenizers, their working mechanisms and impact on processing of fruits and vegetables. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 63(14), 2004-2017.
- Kentish S, Ashokkumar, M. 2011. The physical and chemical effects of ultrasound. In: Feng H, Barbosa-Canovas G, Weiss J, editors. *Ultrasound technologies for food and bioprocessing*, Springer Science+Business Media, New York, USA. pp. 1–12
- Khandpur, P., & Gogate, P. R. (2015). Understanding the effect of novel approaches based on ultrasound on sensory profile of orange juice. *Ultrasonics sonochemistry*, 27, 87-95.
- Knorr D, Zenker M, Heinz V, Lee DU. 2004. Applications and ultrasonics in food potential of processing. *Trends Food Sci Technol* 15(5):261–6.
- Krautkrämer, J.; Krautkrämer, H. *Ultrasonic Testing of Materials*; Springer Science & Business Media: Heidelberg, Germany, 2013.
- Krokida, M. K., Maroulis, Z. B., & Kremalis, C. (2002). Process design of rotary dryers for olive cake. *Drying Technology*, 20, 771–788.
- Laddomada, B., Caretto, S., & Mita, G. (2015). Wheat Bran Phenolic Acids: Bioavailability and Stability in Whole Wheat-Based Foods. *Molecules*, 20(9), Article 9.
- Li, B. W., & Zhao, Z. (1997). Determination of Starches and Dietary Fiber Polysaccharides in Cooked Dried Beans: Comparison of Different Temperatures and Dimethyl Sulfoxide Treatments. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 45(7), 2598-2601.
- Liébanes, M. D., Aragón, J. M., & Palancar, M. C. (2008). Modeling the moisture sorption isotherms of two-phase solid olive oil by-product. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 110, 413–421.
- Liu, Y., Chen, H., Chen, W., Zhong, Q., Zhang, G., & Chen, W. (2018). Beneficial Effects of Tomato Juice Fermented by *Lactobacillus Plantarum* and *Lactobacillus Casei*: Antioxidation, Antimicrobial Effect, and Volatile Profiles. *Molecules*, 23(9), Article 9.
- Luximon-Ramma, A., Baborun, T., Soobrattee, M. A., & Aruoma, O. I. (2002). Antioxidant activities of phenolic, proanthocyanidin, and flavonoid components in extracts of *Cassia fistula*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(18), 5042–5047.
- M. Nowacka, M. Wedzik. Effect of ultrasound treatment on microstructure, colour and carotenoid content in fresh and dried carrot tissue. *Appl. Acoust.*, 103 (2016), pp. 163-171
- M. Regier, K. Knoerzer, H. Schubert. *Introducing microwave-assisted processing of food: Fundamentals of the technology*, Second Edi. Elsevier Ltd (2017), doi: 10.1016/B978-0-08-100528-6.00001-2
- M.A. Karim, M.N.A. Hawlader. Mathematical modelling and experimental investigation of tropical fruits drying. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 48 (23–24) (2005), pp. 4914-4925
- M.Niero, et al. (2017) Combining eco-efficiency and eco-effectiveness for continuous loop beverage packaging systems: lessons from the Carlsberg circular community, *Journal of Industrial Ecology*, 21(3), 742-753.
- Martínez-Las Heras, R., Landines, E., Heredia, A., Castelló, M. and Andrés, A. (2017a). 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(9), pp.2902-2912.
- Martins, E. M. F., Ramos, A. M., Vanzela, E. S. L., Stringheta, P. C., de Oliveira Pinto, C. L., & Martins, J. M. (2013). Products of vegetable origin: A new alternative for the consumption of probiotic bacteria. *Food Research International*, 51(2), 764-770.
- Martysiak-Żurowska, D., & Wenta, W. (2012). A comparison of ABTS and DPPH methods for assessing the total antioxidant capacity of human milk. *Acta Scientiarum Polonorum. Technologia Alimentaria*, 11(1), 83-89.
- Maskan, M. Drying, shrinkage and rehydration characteristics of kiwifruits during hot air and microwave drying. *J. Food Eng.* 2001, 48, 177–182.

- Miedzobrodzka, A.; Ciesllk, E.; Sikora, E. Changes in the content of nitrate and nitrites in carrot roots during storage in the clamp. *Rocz. Panstw. Zakl. Hig.* 1992, 43, 33–36.
- Mikulski, D., & Kłosowski, G. (2020). Microwave-assisted dilute acid pretreatment in bioethanol production from wheat and rye stillages. *Biomass and Bioenergy*, 136, 105528.
- Miletic, N.; Mitrovic, O.; Popovic, B.; Nedovic, V.; Zlatkovic, B.; Kandic, M. Polyphenolic content and antioxidant capacity in fruits of plum (*Prunus Domestica* L.) cultivars ‘Valjevka’ and ‘Mildora’ as influenced by air drying. *J. Food Qual.* 2013, 36, 229–237.
- Mujumdar, A. S. (2007). An overview of innovation in industrial drying: current status and R&D needs. *Transport in porous media*, 66, 3-18.
- Murrieta-Pazos, I., Gaiani, C., Galet, L., Calvet, R., Cuq, B., & Scher, J. (2012). Food powders: Surface and form characterization revisited. *Journal of Food Engineering*, 112(1), 1-21.
- Nasrin, T. A. A., & Matin, M. A. (2017). Valorization of Vegetable Wastes. In *Food Processing By-Products and their Utilization* (pp. 53–88). Wiley.
- Natella, F., Belelli, F., Ramberti, A., & Scaccini, C. (2010). Microwave and traditional cooking methods: Effect of cooking on antioxidant capacity and phenolic compounds content of seven vegetables. *Journal of Food Biochemistry*, 34(4), 796–810.
- Nikolić, S., Mojović, L., Rakin, M., Pejin, D., & Pejin, J. (2011). Utilization of microwave and ultrasound pretreatments in the production of bioethanol from corn. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 13(4), 587-594.
- Niveditha, A., Chidanand, D. V., & Sunil, C. K. (2023). Effect of ultrasound-assisted drying on drying kinetics, color, total phenols content and antioxidant activity of pomegranate peel. *Measurement: Food*, 12, 100114.
- Omre, P., & Singh, S. (2018). Waste utilization of fruits and vegetables-A review. In *South Asian Journal of Food Technology and Environment* (Vol. 4, Issue 1).
- Ordóñez-Santos, L. E., Martínez-Girón, J., & Arias-Jaramillo, M. E. (2017). Effect of ultrasound treatment on visual color, vitamin C, total phenols, and carotenoids content in Cape gooseberry juice. *Food Chemistry*, 233, 96–100.
- Óscar Rodríguez, Wesley Gomes, Sueli Rodrigues, Fabiano A.N. Fernandes, Effect of acoustically assisted treatments on vitamins, antioxidant activity, organic acids and drying kinetics of pineapple, *Ultrasonics Sonochemistry*, Volume 35, Part A, 2017, Pages 92-102, ISSN 1350-4177,
- Özcan, M. M., Al Juhaimi, F., Uslu, N., Ahmed, I. A. M., Babiker, E. E., Osman, M. A., Gassem, M. A., Alqah, H. A. S., & Ghafoor, K. (2020). Effect of sonication process of terebinth (*Pistacia terebinthus* L.) fruits on antioxidant activity, phenolic compounds, fatty acids and tocopherol contents. *Journal of Food Science and Technology*, 57(6), 2017-2025.
- P. Russo, G. Adiletta, M. Di Matteo. The influence of drying air temperature on the physical properties of dried and rehydrated eggplant. *Food Bioprod. Process.*, 91 (3) (2013), pp. 249-256
- Paredes Ortega, P. (2023). Obtención de ingredientes en polvo a partir de tallos de brócoli. Estudio de las etapas de fermentación y secado, y respuesta a la digestión simulada in vitro. Universitat Politècnica de València.
- Park H-M, Hong J-H. Antioxidant activity of extracts with extraction methods from *Phellinus linteus* mycelium on *Mori ramulus*. *Korean. J. Food Preserv.* 21: 565–572 (2014)
- Passos, M. L., & Mujumdar, A. S. (2000). Effect of cohesive forces on fluidized and spouted beds of wet particles. *Powder Technology*, 110(3), 222-238.
- Peleg, H.; Naim, M.; Rouseff, R.L.; Zehavi, U. Distribution of bound and free phenolic acid in oranges (*Citrus sinensis*) and grapefruits (*Citrus paradisi*). *J. Sci. Food Agric.* 1991, 57, 417–426.
- Perricone, M., Bevilacqua, A., Altieri, C., Sinigaglia, M., & Corbo, M. R. (2015). Challenges for the Production of Probiotic Fruit Juices. *Beverages*, 1(2), Article 2.
- Polat, A., Izli, N., & Taskin, O. (2022). ULTRASOUND PRE-TREATMENT APPROACH: CONVECTIVE DRYING OF CARROT: CONVECTIVE DRYING OF CARROT. *Latin American Applied Research - An International Journal*, 52(2).
- Quiles-Carrillo, L., Mellinas, C., Garrigos, M. C., Balart, R., & Torres-Giner, S. (2019). Optimization of Microwave-Assisted Extraction of Phenolic Compounds with Antioxidant Activity from Carob Pods. *Food Analytical Methods*, 12(11), 2480-2490.
- R. Crittenden. Incorporating probiotics into foods. Y.-K. Lee, S. Salminen (Eds.), *Handbook of Probiotics*, Wiley-Interscience, New Jersey (2009), pp. 58-75
- Rabeta, \*, & Lai, S. Y. (2013). Effects of drying, fermented and unfermented tea of *Ocimum tenuiflorum* Linn. on the antioxidant capacity. In *International Food Research Journal* (Vol. 20, Issue 4).

- Ramírez-Pulido B, Bas-Bellver C, Betoret N, Barrera C, Seguí L (2021) Valorization of vegetable fresh-processing residues as functional powdered ingredients. A review on the potential impact of pretreatments and drying methods on Bioactive compounds and their bioaccessibility. *Front Sustain Food Syst* 5:82.
- Re, R., Pellegrini, N., Proteggente, A., Pannala, A., Yang, M., & Rice-Evans, C. (1999). *Original Contribution ANTIOXIDANT ACTIVITY APPLYING AN IMPROVED ABTS RADICAL CATION DECOLORIZATION ASSAY*.
- Rico, D., Villaverde, A., Martínez-Villaluenga, C., Gutiérrez, A. L., Caballero, P. A., Ronda, F., Peñas, E., Frias, J., & Diana, A. B. M. (2020). Application of autoclave treatment for development of a natural wheat bran antioxidant ingredient. *Foods*, 9(6).
- ROBBINS, R. C. (1980). Medical and Nutritional Aspects of Citrus Bioflavonoids. En *Citrus Nutrition and Quality* (Vol. 143, pp. 43-59). AMERICAN CHEMICAL SOCIETY.
- Rodríguez-Padrón, D., Zhao, D., Garín Ortega, R. N., Len, C., Balu, A. M., García, A., & Luque, R. (2020). Characterization and Antioxidant Activity of Microwave-Extracted Phenolic Compounds from Biomass Residues. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 8(3), 1513-1519.
- Rose, J.L. *Ultrasonic Guided Waves in Solid Media*; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2014.
- Ruiz-Celma, A., Rojas, S., & Lopez-Rodriguez, F. (2008). Mathematical modelling of thin-layer infrared drying of wet olive husk. *Chemical Engineering and Processing*, 47, 1810–1818.
- S. Gupta, S. Cox, N. Abu-Ghannam. Effect of different drying temperatures on the moisture and phytochemical constituents of edible Irish brown seaweed. *LWT - Food Sci. Technol.*, 44 (5) (2011), pp. 1266-1272
- S. Seiedlou, H.R. Ghasemzadeh, N. Hamdami, F. Talati, M. Moghaddam. Convective drying of apple: mathematical modeling and determination of some quality parameters. *Int. J. Agric. Biol.*, 12 (2) (2010), pp. 171-178
- Saeeduddin, M., Abid, M., Jabbar, S., Hu, B., Hashim, M. M., Khan, M. A., ... & Zeng, X. (2016). Physicochemical parameters, bioactive compounds and microbial quality of sonicated pear juice. *International Journal of Food Science & Technology*, 51(7), 1552-1559.
- Şahin Ercan, S., & Aykaç, Ç. (2013). Use of ultrasound in food preservation. *Natural Science*, 05, 5-13.
- Saini, R. K., Nile, S. H., & Park, S. W. (2015). Carotenoids from fruits and vegetables: Chemistry, analysis, occurrence, bioavailability and biological activities. *Food Research International (Ottawa, Ont.)*, 76(Pt 3), 735-750.
- Santiya, M., Aluko, R. E., Puniya, A. K., & Dhewa, T. (2021). Enhancing Micronutrients Bioavailability through Fermentation of Plant-Based Foods: A Concise Review. *Fermentation*, 7(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/fermentation7020063>
- Sayın, F. K. (2015). THE EFFECT OF PICKLING ON TOTAL PHENOLIC CONTENTS AND ANTIOXIDANT ACTIVITY OF 10 VEGETABLES. *Journal of Food and Health Science*.
- Šregelj, V., Vulić, J., Četković, G., Čanadanovć-Brunet, J., Tumbas Šaponjac, V., & Stajčić, S. (2021). Natural bioactive compounds in carrot waste for food applications and health benefits. In *Studies in Natural Products Chemistry* (Vol. 67, pp. 307–344). Elsevier B.V.
- Shahidi, F., Liyana-Pathirana, C. and Wall, D. (2006). Antioxidant activity of white and black sesame seeds and their hull fractions. *Food Chemistry*, 99(3), pp.478-483.
- Sharma, H.K.; Kumar, N. Utilization of Carrot Pomace. In *Food Processing By-Products and their Utilization*; Anal, A.K., Ed.; John Wiley & Sons Ltd.: Hoboken, NJ, USA, 2017; pp. 207–229.
- Sharma, K. D., Karki, S., Thakur, N. S., & Attri, S. (2012). Chemical composition, functional properties and processing of carrot—A review. *Journal of Food Science and Technology*, 49(1), 22-32.
- Sharma, R., Garg, P., Kumar, P., Bhatia, S. K., & Kulshrestha, S. (2020). Microbial Fermentation and Its Role in Quality Improvement of Fermented Foods. *Fermentation*, 6(4), Article 4.
- Shrivastva, R.P. and Sanjeev Kumar, 2005. Fruit and vegetable preservation principles and practices. International Book Distributing Co., Lukhnow, Utter Pradesh (India)
- Simon PW. Domestication, Historical Development and Modern Breeding of Carrot, *Plant Breeding Reviews* 2000;19:157-190.
- Singh, B., Panesar, P. S., Panesar, P. S., & Nanda, V. (2006). Utilization of Carrot Pomace for the Preparation of a Value Added Product. In *World Journal of Dairy & Food Sciences* (Vol. 1, Issue 1).
- Singh, M. N., Srivastava, R., & Yadav, Dr. I. (2021). Study of different varieties of carrot and its benefits for human health: A review. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 10(1), 1293–1299.
- Singh, R., Mangaraj, S., & Kulkarni, S. d. (2006). Particle-Size Analysis of Tomato Powder. *Journal of Food Processing and Preservation*, 30(1), 87-98.



- Singleton, V. L., Orthofer, R., Lamuela-Raventós, R. M. (1999). Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of folin-ciocalteu reagent. *Methods in enzymology*, 299, 152-178.
- SOFA 2019—*The State of Food and Agriculture in the World*. (s. f.). Wwww.Fao.Org. Recuperado 17 de junio de 2024, de <https://www.fao.org/state-of-food-agriculture/2019/en/>
- Song, X., Ma, M., Wang, Y., Chen, L., Yu, J., Yin, H., & Shang, Q. (2022). *In Vitro Fermentation of Carrot Juice by the Human Gut Micro-biota: Potential Use of It as A Novel Prebiotic Agent*.
- Speizer, F.E., Colditz, G.A., Hunter, D.J., Rosner, B., Hennekens, C. (1999). Cancer cause control, 10 (5): 475-82.
- Sun, R. C., Sun, X. F., & Ma, X. H. (2002). Effect of ultrasound on the structural and physiochemical properties of organosolv soluble hemicelluloses from wheat straw. *Ultrasonics Sonochemistry*, 9(2), 95-101.
- Tamang JP. *Himalayan Fermented Foods: Microbiology, Nutrition and Ethnic Values*. New Delhi, India: CRC Press; 2009.
- Tao, Y.; Sun, D.W. Enhancement of food processes by ultrasound: A review. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* **2015**, *55*, 570–594.
- Tapiero H, Townsend DM, Tew KD (2004). The role of carotenoids in the prevention of human pathologies. *Biomed Pharmacother* 58: 100–110.
- Thorat, P. P., Sadawarte, S. K., Sawate, A. R., & Machewad, G. M. (2017). Studies on Effect of Fermentation on Physicochemical Properties of Vegetables and Preparation of Sauce. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 6(8), 3537–3545.
- 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.
- Torronen, R., Lehmusaho, M., Hakkinen, S., & Hanninen, O. Mykkanen,(1996), Serum  $\beta$ -Carotene Response to Supplementation With Raw Carrots, Carrot Juice of Purified  $\beta$ -Carotene in Healthy Non-Smoking Women. *Nutr. Res*, 16, 565-575.
- Vega-Gálvez, A., Miranda, M., Puente-Díaz, L., López, L., Uribe, E., Rodriguez, K., et al. (2010). Effective moisture diffusivity determination and mathematical modelling of the drying curves of the olive-waste cake. *Bioresource Technology*, 101, 7265–7270.
- Vesterlund, S., Salminen, K., Salminen, S. (2012). Water activity in dry foods containing live probiotic bacteria should be carefully considered: A case study with *Lactobacillus rhamnosus* GG in flaxseed. *International Journal of Food Microbiology*, 157(2), pp.319-321.
- Wang, Jun & Ye, Jinghua & Wang, Jin & Raghavan, Vijaya. (2019). Ultrasound Pretreatment to Enhance Drying Kinetics of Kiwifruit (*Actinidia deliciosa*) Slices: Pros and Cons. *Food and Bioprocess Technology*. 12. 10.1007/s11947-019-02256-4.
- Wang, W., Ma, X., Zou, M., Jiang, P., Hu, W., Li, J., Zhi, Z., Chen, J., Li, S., Ding, T., Ye, X., & Liu, D. (2015). Effects of Ultrasound on Spoilage Microorganisms, Quality, and Antioxidant Capacity of Postharvest Cherry Tomatoes. *Journal of Food Science*, 80(10), C2117–C2126.
- Wu, X., Zhao, R., Bean, S. R., Seib, P. A., McLaren, J. S., Madl, R. L., Tuinstra, M., Lenz, M. C., & Wang, D. (2007). Factors Impacting Ethanol Production from Grain Sorghum in the Dry-Grind Process. *Cereal Chemistry*, 84(2), 130-136.
- Y. Huang, C. Zheng, C.S. Liu, *et al.* Effect of microwave pretreatment on oil quality and antioxidant properties of perilla seed. *Cereals & Oils*, 32 (5) (2019), pp. 53-55.
- Y. Rivera-Espinoza, Y. Gallardo-Navarro. Non-dairy probiotic products. *Food Microbiology*, 27 (2010), pp. 1-11
- Y.G. Chen, A. Martynenko. Computer vision for real-time measurements of shrinkage and color changes in blueberry convective drying. *Dry. Technol.*, 31 (10) (2013), pp. 1114-1123
- Yang, X., Zhou, J., Fan, L., Qin, Z., Chen, Q., & Zhao, L. (2018). Antioxidant properties of a vegetable–fruit beverage fermented with two *Lactobacillus plantarum* strains. *Food Science and Biotechnology*, 27(6), 1719-1726.
- Yang, X.; Hong, J.; Wang, L.; Cai, C.; Mo, H.; Wang, J.; Fang, X.; Liao, Z. Effect of Lactic Acid Bacteria Fermentation on Plant-Based Products. *Fermentation* **2024**, *10*, 48.
- Yu, J., Engeseth, N. J., & Feng, H. (2016). High Intensity Ultrasound as an Abiotic Elicitor—Effects on Antioxidant Capacity and Overall Quality of Romaine Lettuce. *Food and Bioprocess Technology*, 9(2), 262-273.
- Yusuf, E., Tkacz, K., Turkiewicz, I. P., Wojdyło, A., & Nowicka, P. (2021). Analysis of chemical compounds' content in different varieties of carrots, including qualification and quantification of sugars, organic acids, minerals, and bioactive compounds by UPLC. *European Food Research and Technology*, 247(12), 3053-3062.

- Zalewska, M., Marcinkowska-Lesiak, M., & Onopiuk, A. (2022). Application of different drying methods and their influence on the physicochemical properties of tomatoes. *European Food Research and Technology*.
- Zeb, A., Haq, A., & Murkovic, M. (2019). Effects of microwave cooking on carotenoids, phenolic compounds and antioxidant activity of *Cichorium intybus* L. (chicory) leaves. *European Food Research and Technology*, 245(2), 365-374.
- Zhao, H.-M., Guo, X.-N., & Zhu, K.-X. (2017). Impact of solid state fermentation on nutritional, physical and flavor properties of wheat bran. *Food Chemistry*, 217, 28-36.
- Zisu, B., Lee, J., Chandrapala, J., Bhaskaracharya, R., Palmer, M., Kentish, S., & Ashokkumar, M. (2011). Effect of ultrasound on the physical and functional properties of reconstituted whey protein powders. *Journal of Dairy Research*, 78(2), 226-232.
- Zou, Y., & Jiang, A. (2016). Effect of ultrasound treatment on quality and microbial load of carrot juice. *Food Science and Technology*, 36, 111-115.
- Zou, Y., Xie, C., Fan, G., Gu, Z., & Han, Y. (2010). Optimization of ultrasound-assisted extraction of melanin from *Auricularia auricula* fruit bodies. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 11(4), 611-615.