

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y FARMACÉUTICAS



Efecto de diferentes métodos de secado sobre las propiedades estructurales y compuestos bioactivos de un snack obtenido mediante impresión 3D en base al alga Cochayuyo (*Durvillaea antarctica*) y harina de arroz.

Tesis presentada a la Universidad de Chile para optar al grado de Magíster en Alimentos mención Gestión, Calidad e Inocuidad de los Alimentos por:

Fernanda Alejandra Chandía Vásquez

Director de Tesis: Roberto Lemus Mondaca

Co- Director de Tesis: Jaime Ortiz Viedma

Santiago-Chile

Diciembre-2024

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y FARMACÉUTICAS

INFORME DE APROBACIÓN DE TESIS DE MAGÍSTER

Se informa a la Dirección de la Escuela de Postgrado de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas que la Tesis de Magíster presentada por la candidata

Fernanda Alejandra Chandía Vásquez

Ha sido aprobada por la Comisión de Evaluadora de Tesis como requisito para optar al grado de Magíster en Alimentos mención Gestión, Calidad e Inocuidad de los Alimentos, en el examen público rendido el día 19 de diciembre de 2024.

Director de Tesis:

Dr. Roberto Lemus Mondaca



Co-director de Tesis:

Dr. Jaime Ortiz Viedma



Comisión Evaluadora de Tesis:

M.S.c Nalda Romero Palacios

Dr. Cristian Tapia Villanueva

Dra. Paula Jiménez Patiño

“La permanencia, perseverancia y persistencia a pesar de todos los obstáculos, desalientos e imposibilidades: es eso lo que distingue las almas fuertes de las débiles”

Thomas Carlyle

AGRADECIMIENTOS

A Ramón y Santiago, quienes estuvieron en todo momento conmigo y me sostuvieron en los períodos más arduos. Por creer en mi desafío y hacerlo parte de sus vidas.

A mis padres, Nancy y Marco, quienes con su ejemplo de perseverancia me han impregnado dicho valor.

A la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo, ANID- Subdirección de Capital Humano/Magíster Nacional/2022-22220189, por el financiamiento para estudiar el programa de post grado.

A mi director y codirector de tesis, por compartir sus conocimientos.

A los profesores miembros de la comisión, quienes, con sus observaciones me permitieron desarrollar un mejor trabajo.

Al personal técnico de laboratorio y profesores de apoyo, quienes me orientaron en el trabajo técnico, y me prestaron los equipos y protocolos para realizar algunos análisis.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	9
I. INTRODUCCIÓN	10
II. CUERPO DE LA OBRA	11
2.1 Impresión tridimensional (3D) de alimentos	11
2.1.1 Impresión del objeto.....	12
2.1.2 Aplicaciones de la tecnología de impresión 3D en alimentos	13
2.2 Composición química, fibra dietética y compuestos bioactivos en algas.....	16
2.2.1 Composición química en <i>Durvillaea antarctica</i>	18
2.2.1.1 Cambios en la composición química post procesamiento.....	21
2.2.2 Fibra dietética en <i>Durvillaea antarctica</i>	23
2.2.2.1 Cambios en la fibra dietética post procesamiento	24
2.2.3 Compuestos bioactivos en <i>Durvillaea antarctica</i>	25
2.2.3.1 Cambios en el contenido de compuestos bioactivos post procesamiento	28
2.3 Post procesamiento	29
2.3.1 Secado por horno.....	30
2.3.2 Secado por aire forzado.....	30
2.3.3 Secado por liofilización	32
2.3.4 Curvas de secado en algas	33
2.6 Hipótesis	35
2.7 Objetivo general.....	35
2.8 Objetivos específicos.....	35
2.9 Metodología	36
2.9.1 Materia prima	36
2.9.2 Preparación de la mezcla a imprimir.....	37
2.9.3 Impresión 3D.....	37
2.9.4 Curvas de secado, proceso de secado y selección condición óptima de temperatura	38
2.9.5 Composición química, compuestos bioactivos y capacidad antioxidante	45
2.9.6 Análisis estadístico.....	46
III. RESULTADOS	49
3.1 Secado.....	49
3.1.1 Curvas de secado experimentales y modeladas	49
3.1.2 Pérdida de peso de las muestras post procesadas según método de secado	52
3.2 Selección condición óptima de temperatura de los métodos de secado por horno y aire forzado	55
3.2.1 Análisis de forma.....	55
3.2.2 Análisis del color superficial final	58
3.2.3 Análisis de la textura	62
3.3 Análisis composición química, compuestos bioactivos y capacidad antioxidante	67
3.3.1 Análisis composición química	67
3.3.2 Compuestos bioactivos	70

3.3.3 Capacidad antioxidante	74
IV. CONCLUSIÓN	78
V. BIBLIOGRAFÍA	79
VI. ANEXOS	86

ÍNDICE TABLAS

Tabla 1. Procesos de impresión 3D disponibles actualmente	13
Tabla 2. Categorías de los ingredientes utilizados en la impresión 3D	14
Tabla 3. Desembarque total algas 2021, Chile	17
Tabla 4. Composición química en <i>Durvillaea antarctica</i> (hojas y tallo) en estado fresco	18
Tabla 5. Contenido de aminoácidos en <i>Durvillaea antarctica</i> (hojas y tallo) expresado en mg/100 g de alga seca	20
Tabla 6. Contenido de ácidos grasos en <i>Durvillaea antarctica</i> (hojas y tallo) en estado fresco	21
Tabla 7. Composición química en <i>Durvillaea antarctica</i> deshidratada y liofilizada	21
Tabla 8. Composición proximal de <i>Durvillaea antarctica</i> a diferentes temperaturas de secado expresados en base seca	23
Tabla 9. Contenido de fibra dietética en <i>Durvillaea antarctica</i> (hojas y tallo) en estado fresco expresados en base seca	24
Tabla 10. Contenido de fibra dietética en <i>Durvillaea antarctica</i> a diferentes temperaturas de secado expresados en base seca	24
Tabla 11. Concentración de polifenoles totales en <i>Durvillaea antarctica</i>	26
Tabla 12. Contenido total de polifenoles y capacidad antioxidante en extracto de algas	26
Tabla 13. Clases de florotaninos	27
Tabla 14. Equipos utilizados en la metodología	47
Tabla 15. Constantes empíricas modelo Newton	50
Tabla 16. Pérdida de peso de las muestras impresas 3D según método y condición de temperatura de secado	52
Tabla 17. Pérdida de peso de las muestras impresas 3D según método de secado a condición de temperatura de 40°C	53
Tabla 18. Pérdida de peso de las muestras impresas 3D según método de secado a condición de temperatura de 60°C	53
Tabla 19. Pérdida de peso de las muestras impresas 3D según método de secado a condición de temperatura de 80°C	53
Tabla 20. Cambios en la forma de las muestras impresas 3D según condición de temperatura de secado	56
Tabla 21. Cambios en la forma de las muestras impresas 3D según método de secado a condición de temperatura de 40°C	56
Tabla 22. Cambios en la forma de las muestras impresas 3D según método de secado a condición de temperatura de 60°C	56
Tabla 23. Cambios en la forma de las muestras impresas 3D según método de secado a condición de temperatura de 80°C	56
Tabla 24. Coordenadas colorimétricas y cambios en el color superficial final de las muestras impresas 3D según temperatura de secado	59
Tabla 25. Coordenadas colorimétricas y cambios en el color superficial final de las muestras impresas 3D según método de secado a condición de temperatura de 40°C	60
Tabla 26. Coordenadas colorimétricas y cambios en el color superficial final de las muestras impresas 3D según método de secado a condición de temperatura de 60°C	60
Tabla 27. Coordenadas colorimétricas y cambios en el color superficial final de las muestras impresas 3D según método de secado a condición de temperatura de 80°C	60
Tabla 28. Propiedades estructurales a la condición óptima de temperatura de los métodos de secado	66
Tabla 29. Composición química de las muestras según método y condición de secado	67
Tabla 30. Composición química de <i>Durvillaea antarctica</i> en estado fresco, sometida a secado a 80°C y liofilizada	69

ÍNDICE FIGURAS

Figura 1. Durvillaea antarctica en estado fresco.....	18
Figura 2. Durvillaea antarctica en estado deshidratado.....	18
Figura 3. Polifenoles totales en Durvillaea antarctica sometida a diferentes temperaturas de secado.....	29
Figura 4. Capacidad antioxidante en Durvillaea antarctica sometida a diferentes temperaturas de secado.....	29
Figura 5. Esquema funcionamiento de un secador de horno.....	31
Figura 6. Esquema funcionamiento de un secador de túnel.....	31
Figura 7. Curva de secado típica de materiales húmedos.....	32
Figura 8. Etapas proceso liofilización.....	32
Figura 9. (a)Comportamiento curva de secado y (b)Curvas experimentales de velocidad de secado de Durvillaea antarctica a 40, 50, 60, 70 y 80°C.....	33
Figura 10. Comportamiento curva de secado de Gracilaria chilensis a 40, 50, 60 y 70°C.....	34
Figura 11. Formulación óptima mezcla impresión 3D.....	37
Figura 12. Impresión por extrusión impresora 3D.....	38
Figura 13. Características dimensionales a utilizar.....	42
Figura 14. Escenario con parámetros de fondo, luz y ángulo controlados.....	43
Figura 15. Espacio de color CIELab.....	43
Figura 16. Puntos de análisis del color superficial final de la estructura impresa 3D.....	44
Figura 17. Resumen metodología utilizada.....	48
Figura 18. Razón de humedad experimental y modelada del producto impreso en 3D sometido a 40, 60 y 80°C en horno.....	50
Figura 19. Relación entre logaritmo k y temperatura.....	51
Figura 20. Fuerza máxima según método y condición de temperatura.....	63
Figura 21. Comparación de la fuerza máxima a una misma condición de temperatura según método de secado.....	63
Figura 22. Imágenes de la estructura impresa 3D según método de secado y condición de temperatura.....	65
Figura 23. Contenido de polifenoles totales según método y condición de temperatura.....	70
Figura 24. Capacidad antioxidante por DPPH según método y condición de temperatura.....	74
Figura 25. Capacidad antioxidante por ORAC según método y condición de temperatura.....	75

RESUMEN

En Chile, el 1% de las especies de algas son mayormente consumidas, dentro de estas el Cochayuyo (*Durvillaea antarctica*). La impresión 3D de alimentos transforma características organolépticas de los alimentos. El objetivo fue comparar los efectos de diferentes métodos de secado sobre las propiedades estructurales, contenido polifenoles totales y capacidad antioxidante de un snack impreso 3D en base a Cochayuyo.

Se formuló una mezcla de harina de Cochayuyo, harina de arroz y agua, para el desarrollo de un snack por impresión 3D. Luego, las muestras impresas fueron post procesadas mediante horno y aire forzado a diferentes condiciones de temperatura (40, 60 y 80°C), incluido el proceso de liofilización (-55°C y 0,021 mbar). Para el secado en horno y aire forzado, se seleccionó la temperatura óptima que mejor preservó las propiedades estructurales de los snacks post procesados (forma, color superficial final y textura). Finalmente, se determinó el contenido de polifenoles totales (Folin-Ciocalteu) y capacidad antioxidante (DPPH y ORAC) de las muestras control (snack en estado fresco), liofilizadas y post procesadas a la temperatura óptima de horno y aire forzado.

Respecto a las propiedades estructurales, la condición de temperatura de 80°C en horno y aire forzado, permitió una menor pérdida de la forma en comparación al modelo digital de impresión (% Δ A: Horno 15,05 y Aire forzado 11,78; % Δ Ls: Horno 16,35 y Aire forzado 15,28; % Δ Li: Horno 12,88 y 10,28), un menor cambio de color superficial final en comparación a las muestras control (Δ E: Horno 13,73 y Aire forzado 16,18) y una menor dureza de las muestras (Fuerza máxima: Horno 8,69 N y Aire forzado 10,24 N). Con relación al contenido de polifenoles totales y capacidad antioxidante, las muestras control fueron las que presentaron un mayor contenido de polifenoles totales (62,22 mg GAE/100g ms). Para la capacidad antioxidante mediante DPPH, las muestras control fueron las que presentaron una mayor capacidad (180,78 μ moles ET/100g ms), seguidas por aquellas sometidas a secado en horno (41,51 μ moles ET/100g ms). Mediante ORAC, no hubo diferencias significativas entre muestras control y post procesadas ($p < 0,05$).

Palabras claves: Impresión 3D alimentos, *Durvillaea antarctica*, post procesamiento, compuestos bioactivos.

I. INTRODUCCIÓN

Exposición general del problema

La cantidad de algas conocidas y descritas en el mundo es muy variable, siendo un rango aproximado entre treinta mil y un millón (Ścieszka et al., 2019). Los países con mayor producción, cultivo y consumo de estos alimentos son Japón y China. A nivel mundial, solo el 66% de las especies de algas son utilizadas como alimento humano (Quitral et al., 2012). A nivel nacional, existen alrededor de 550 especies de algas que crecen en un hábitat bentónico. Solo el 1% de las especies de algas en Chile son mayormente consumidas, dentro de ellas la especie *Durvillaea antarctica*, más conocida como Cochayuyo (Quitral et al., 2019). Las algas tienen diferentes usos, dentro de los cuales se encuentran fines tecnológicos, consumo humano, consumo animal, fertilizante, entre otros. Sus diversas propiedades y composición química se generan por el aporte de proteínas, vitaminas, minerales y fibra dietética, los cuales permiten que sean un alimento versátil. En ese sentido, si bien sus propiedades son múltiples, así como los diversos beneficios para la salud humana, existe un bajo consumo en la población nacional asociado a las características organolépticas como sabor y aroma que presenta el alga.

La alternativa de imprimir productos alimenticios en 3D, en base a Cochayuyo (*Durvillaea antarctica*), puede fomentar el consumo de algas. La obtención de un producto en impresión 3D permite cambiar la forma en la cual se presentará un alimento. Para ello, se requiere generar una mezcla imprimible en base a harina de *Durvillaea antarctica* y harina de arroz, para luego someter a diferentes métodos y temperaturas de secado con el fin de comparar las propiedades estructurales y compuestos bioactivos. El aporte de este estudio será dar una nueva forma de consumo del producto en base a alga, tipo snack. Se denomina snack, a una estructura impresa 3D, la cual puede encontrarse con la formulación en estado fresco o bien haber sido post procesado mediante secado (Uribe-Wandurraga et al., 2020; Derossi et al., 2021; Letras et al., 2022; Oliveira et al., 2022).

II. CUERPO DE LA OBRA

2.1 Impresión tridimensional (3D) de alimentos

La impresión tridimensional (3D) de alimentos es una técnica que se basa en un proceso de manufactura “aditivo”, el cual consiste en la disposición de capa por capa de un espesor predeterminado para crear estructuras complejas de forma libre (Prakash et al, 2019). La primera impresión 3D fue de órganos entre los años 2000 y 2010. En el ámbito de los alimentos, la primera aplicación de la impresión 3D fue para personalizar pasteles (Baiano, 2020). Dentro de las aplicaciones exitosas de la impresión 3D, han sido en las áreas aeroespacial, mecánica electrónica, industria química, biología, medicina y alimentos (Chen et al., 2022).

Prakash et al. (2019), mencionan que la impresión 3D permite crear nuevas texturas y consistencias para personas mayores y pacientes con disfagia, así como promocionar el consumo de frutas y verduras en niños/as, solucionar enfermedades producidas por los estilos de vida, entre otras. Tran (2019), menciona que la impresión 3D puede ser la solución al problema de la escasez de alimentos, eliminación de la malnutrición, reducción del impacto del cambio climático y solución del suministro de alimentos para astronautas y personal militar.

Los pasos claves de la impresión 3D son: El diseño del modelo, impresión del objeto y post procesamiento (Chen et al., 2022). El presente estudio se basó en las etapas de impresión y post procesamiento del objeto, ya que el diseño que se utilizó se encontraba disponible en el software del equipo de impresión.

2.1.1 Impresión del objeto

Se pueden utilizar diferentes tecnologías, las cuales según Enfield et al. (2022), se pueden agrupar en siete categorías principales: fotopolimerización en cuba, chorro de material, chorro aglomerante, fusión de lecho de polvo, extrusión de material, deposición de energía dirigida y laminación de láminas. En el caso de Tomašević et al. (2021), establece cuatro categorías: Impresión por extrusión, posicionamiento selectivo, chorro aglomerante e impresión por inyección de tinta. Dentro de las categorías indicadas, la impresión por extrusión es el método más utilizado hoy en día para la impresión de alimentos funcionales (Tomašević et al., 2021) debido a que:

- Imprime diferentes materiales con propiedades reológicas distintas.
- Es una tecnología con amplia aplicación en otras áreas, lo cual permite adoptar soluciones técnicas más fácilmente, así como equipos para la producción de alimentos e investigación.
- Los parámetros de impresión se pueden modificar en la mayoría de los equipos, ya que utilizan software con código abierto.

La tabla 1 compara las tecnologías, ventajas y limitaciones de los diferentes procesos de impresión disponibles actualmente.

Tabla 1. Procesos de impresión 3D disponibles actualmente

Proceso de impresión	Tecnología	Ventajas	Limitaciones
Fotopolimerización en cuba	Estereolitografía	<ul style="list-style-type: none"> - Precisión - Alta resolución - Versatilidad 	<ul style="list-style-type: none"> - Estructuralmente débil - Costoso - Post procesamiento prolongado - Materiales limitados
Inyección de material	Inyección de tinta	<ul style="list-style-type: none"> - Precisión - Velocidad - A todo color 	<ul style="list-style-type: none"> - Estructuralmente débil - Costoso - Materiales limitados
Inyección de aglutinante		<ul style="list-style-type: none"> - Velocidad - Gama de colores - Grandes volúmenes de construcción - Partes complejas - Polvo reciclable 	<ul style="list-style-type: none"> - Estructuralmente débil - Baja resolución
Fusión de lecho de polvo	Sinterización selectiva por láser	<ul style="list-style-type: none"> - Partes funcionales - Buenas propiedades mecánicas - Geometría compleja 	<ul style="list-style-type: none"> - Velocidad - Materias primas costosas - Acabado superficial rugoso
Extrusión de material	Modelado por deposición fundida	<ul style="list-style-type: none"> - Gama de materiales - Rango de precio - Accesible - Fácil de usar 	<ul style="list-style-type: none"> - Velocidad - Precisión
Deposición de energía dirigida		<ul style="list-style-type: none"> - Bueno para reparaciones - Velocidad - Partes totalmente densas - Gran área de construcción 	<ul style="list-style-type: none"> - Precisión - Baja resolución - Tecnología compleja
Laminación de láminas	Fabricación de objetos laminados	<ul style="list-style-type: none"> - Bajo costo de material - Gran área de construcción - Fácil manejo de materiales 	<ul style="list-style-type: none"> - Baja resolución - Geometría limitada - Desperdicio de material - Post procesamiento prolongado

Fuente: Enfield et al. (2022)
Traducción propia (2022)

2.1.2 Aplicaciones de la tecnología de impresión 3D en alimentos

Para que un alimento sea imprimible, se requiere que la mezcla pueda ser impresa, y además tenga una estabilidad estructural para preservar un diseño final programado. Los ingredientes requeridos para la impresión de alimentos se pueden clasificar en tres categorías indicadas, descritas y ejemplificadas en la tabla 2.

Tabla 2. Categorías de los ingredientes utilizados en la impresión 3D

Categoría	Materiales imprimibles de manera naturalmente	Materiales alimentarios tradicionales no imprimibles	Ingredientes alternativos
Descripción	Son aquellos materiales que dada su composición y características pueden ser extruidos directamente por la jeringa de la impresora o en forma de polvo, y de manera posterior soportar su propia estructura.	Son aquellos materiales que por su composición y características no pueden ser extruidos de manera adecuada por si solos, sino que requieren de la adición de mejoradores de flujo y viscosidad, tales como almidón, pectina, gelatina, goma xantana, agar y alginato.	Son aquellos que son fuentes de compuestos funcionales y bioactivos.
Ejemplos	Masas, queso, chocolate, glaseado, hummus, mantequilla, azúcar, almidón, entre otros.	Carne, arroz, frutas y verduras.	Proteínas, fibras, algas, hongos, microorganismos y residuos de procesos agrícolas y alimentarios.

Fuente: Baiano (2020) y Almeida-Bodero et al. (2021)

Diversos autores han mencionado en sus trabajos las aplicaciones de la tecnología de la impresión 3D en alimentos. Dentro de estas se encuentran:

- a) **Modificación de textura:** Es una característica propia de cada alimento. En personas con problemas para deglutir alimentos (disfagia), la textura de estos es fundamental al momento de su alimentación, ya que para poder ingerirlos deben modificar la textura de los alimentos, lo cual es menos atractivo en apariencia, textura y sabor, siendo menos consumidos. Es así, como la impresión 3D de alimentos ha permitido modificar texturas para poder dar alternativas de consumo a este grupo de personas. También ha permitido reproducir con la mezcla de impresión, la apariencia original de un alimento (Prakash, 2019; Baiano, 2020).

- b) **Formulación de alimentos saludables, reducidos en grasas, azúcar y sal:** Esta tecnología permite situar estos ingredientes entre capas y no necesariamente incorporarlos a toda la mezcla, lo cual permite reducir su cantidad utilizada. Lo anterior, se logra situando la grasa, azúcar o sal en las capas iniciales que van a tener contacto con la cavidad oral del consumidor durante la primera mordida del alimento. En el caso de la grasa, la impresión

3D no solo permite reducir la cantidad utilizada en los alimentos, sino que también disminuye la oxidación de los lípidos por encontrarse entre capas del producto, y por ende menos expuestos a la luz y oxígeno. Es así, que esta tecnología también permitiría utilizar ingredientes funcionales, los cuales presentan una mayor susceptibilidad a la oxidación (Prakash, 2019). Por otra parte, esta tecnología ha permitido variar el contenido nutricional de un producto, reducir o eliminar sustancias consideradas factores anti nutricionales, así como incorporar otras que tendrán efectos benéficos en la salud como proteínas, vitaminas, fitoquímicos, entre otros (Baiano, 2020).

c) **Promover el consumo de frutas y verduras:** Estos alimentos proveen vitaminas, minerales, antioxidantes, fibra y otros nutrientes esenciales para el desarrollo. En el caso de los niños/as, en ocasiones el consumo de frutas y verduras se ve mermado al ser más selectivos en escoger el color, sabor, textura y forma de estos. La impresión 3D ha permitido imprimir alimentos con otras texturas y adicionar otros componentes, presentando alternativas más atractivas y amigables para los niños/as (Prakash, 2019). Estos alimentos requieren de una base que pueda ayudar a generar una mezcla capaz de ser impresa, es así como se utilizan aditivos en base a almidón, hidrocoloides e hidrogeles. Sin embargo, una alternativa a estos aditivos son los ingredientes de valor agregado (ingredientes funcionales y compuestos bioactivos), tales como extractos de plantas, algas, fibra, péptidos bioactivos, entre otros (Tomašević et al., 2021).

d) **Promover el consumo de algas:** Las biomásas de algas tienen un gran potencial para la fortificación de alimentos en impresión 3D, dada su composición nutricional caracterizada por un alto contenido de proteínas, minerales, vitaminas, pigmentos, ácidos grasos, esteroides y antioxidantes (Tomašević et al., 2021).

2.2 Composición química, fibra dietética y compuestos bioactivos en algas

Las algas se clasifican en micro y macroalgas. En el caso de las macroalgas, se clasifican taxonómicamente en cuatro grupos: algas pardas (phaeophyta), rojas (rhodophyta), verdes (chlorophyta) y azul-verde (cyanophyta). Su color está determinado por sus pigmentos (Quitral et al., 2012; Ścieszka et al., 2019).

Dada las características y propiedades de estos organismos, sus usos son variados en distintas industrias, como la química, farmacéutica, cosmética, alimentación animal, elaboración de biocombustible, alimentos convencionales, biofermentados, suplementos y funcionales, entre otras. El uso de las algas en la industria alimentaria es diverso debido a sus propiedades tecnológicas (Ortiz et al., 2006; Quitral et al. 2019; Ścieszka et al., 2019) y también por el amplio espectro de metabolitos secundarios bioactivos que producen, dentro de los cuales se encuentran proteínas, lípidos, ácidos grasos poliinsaturados, incluyendo el omega-3, carbohidratos, polisacáridos, polifenoles, esteroides y pigmentos. Además, son una buena fuente de fibra dietética, vitaminas (A, B1, B2, B3, B5, B9, B12, C, D y E) y minerales (calcio, sodio, magnesio, fósforo, potasio, hierro, zinc y yodo). Dentro de las propiedades de las algas, se encuentran actividad antioxidante sobre bacterias, antiviral, antifúngicas, prebióticas, neuroprotectoras del envejecimiento y deterioro neurológico, antiinflamatorias, inmunomoduladoras, antidiabéticas, anticoagulantes y anticancerígenas (Ścieszka et al., 2019).

Respecto al consumo de algas, los países asiáticos son quienes tienen un mayor consumo de estas. Dentro del continente asiático, cabe destacar que Japón y China son los que tienen mayor producción, cultivo y consumo de estos alimentos. Otros países que consumen algas son Escocia, Chile, Filipinas, Malasia, Bali, Corea, Singapur y Sri Lanka. En algunos casos, más que el consumo propiamente tal del alga, su uso está enfocado en la extracción de compuestos que se utilizan con fines tecnológicos en los alimentos como los hidrocoloides (agar, carragenina y alginatos) (Quitral et al., 2012).

En el caso de Chile, al encontrarse geográficamente rodeado por océano, las algas se encuentran en toda la costa del territorio nacional, existiendo alrededor

de 550 especies. El desembarque nacional de algas durante el 2021 fue de 411.858 toneladas, siendo mayor en las regiones de Atacama (III), Los Lagos (X), Antofagasta (II), Coquimbo (IV) y Tarapacá (I) (tabla 3). Dentro de las algas más consumidas en Chile se encuentran Carola (*Callaphyllis variegata*), Chicoria de mar (*Chondracanthus chamossoi*), Luche (*Pyropia sp.*), Cochayuyo (*Durvillaea antarctica*), Lechuguilla (*Ulva lactuca*) y Pelillo (*Gracilaria chilensis*) (Quitral et al., 2019).

Tabla 3. Desembarque total algas 2021, Chile

Especie	Región												Total (toneladas, t)			
	XV	I	II	III	IV	V	VI	VII	XVI	VIII	IX	XIV		X	XI	XII
Carola	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	-	-	2
Chasca	-	-	-	-	14	10	77	3	-	-	-	2	-	-	-	106
Chicorea de mar	-	2	-	33	26	-	-	-	-	252	-	-	89	-	-	402
Cochayuyo	-	-	-	-	569	204	1.282	721	144	2.763	12	996	1.519	4	-	8.214
Haematococcus	-	61	-	-	11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	72
Huiro	-	1.067	2.333	9.678	4.819	1.042	56	-	-	125	-	108	17.293	-	-	36.521
Huiro negro o chascón	253	24.347	60.054	78.652	23.211	4.827	293	1.064	1	2.176	-	-	853	-	-	195.731
Huiro palo	173	2.847	9.838	24.902	28.625	2.274	-	9	4	192	-	121	13	-	-	68.998
Lechuguilla	-	-	-	-	687	-	-	-	-	-	-	-	94	-	-	781
Liquen gomoso	-	-	-	3.900	-	9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.909
Luche	-	-	-	3	109	-	14	19	-	66	-	22	155	36	2	426
Luga cuchara o corta	-	-	-	-	1	-	253	109	-	1.375	-	89	220	-	-	2.047
Luga negra o crespa	-	-	-	-	-	-	4	-	-	4.915	-	697	15.849	-	-	21.465
Luga roja	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	2	8.081	2.547	3.391	14.022
Pelillo	-	-	-	591	3.983	2	-	-	-	2.554	-	529	50.140	1	1	57.801
Espirulina	-	1.361	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.361
Total:	426	29.685	72.225	117.759	62.055	8.368	1.979	1.925	149	14.419	12	2.566	94.308	2.588	3.394	411.858

Fuente: SERNAPESCA (2021)

La especie *Durvillaea antarctica* es una macroalga parda consumida tradicionalmente por la población chilena (Ortiz et al., 2006). Su coloración está dada por la presencia de xantofilas (fucoxantina y flavoxantina) y clorofilas (a y c) (Ortiz, 2011). Es una especie endémica de Chile (Macaya, 2020), que se encuentra desde Coquimbo a Cabo de Hornos. Esta alga mide por sobre los 15 metros y está compuesta por dos partes: las hojas de la planta llamada Cochayuyo y el tallo llamado Ulte (Uribe et al., 2018). A nivel nacional tiene una importancia comercial (Macaya, 2020) y se vende en su estado natural (figura 1), pero principalmente deshidratado para prolongar su vida útil (figura 2).



Figura 1. *Durvillaea antarctica* en estado fresco
Fuente: Macaya (2020)



Figura 2. *Durvillaea antarctica* en estado deshidratado
Fuente: Extraído sitio web Google (2022)

2.2.1 Composición química en *Durvillaea antarctica*

Esta alga parda destaca por la calidad nutricional en cuanto a macronutrientes (proteínas, lípidos y carbohidratos). La tabla 4 muestra la composición química de *Durvillaea antarctica* en estado fresco, en donde los componentes principales son humedad, carbohidratos y cenizas, seguidos de proteínas y lípidos.

Tabla 4. Composición química en *Durvillaea antarctica* (hojas y tallo) en estado fresco

Alga	Humedad	Cenizas	Proteínas	Lípidos	Carbohidratos totales	Fibra dietética	Referencia
<i>Durvillaea antarctica</i> chilena (hojas) ^a	72,3 ± 1,5	17,9 ± 1,2	10,4 ± 0,3	0,8 ± 0,1	70,9 ± 2,7 ^c	68,47 ± 0,5 ^e	Ortiz et al. (2006)
<i>Durvillaea antarctica</i> chilena (tallos) ^a	82,2 ± 0,7	25,7 ± 2,5	11,6 ± 0,9	4,3 ± 0,6	58,4 ± 1,2 ^c	56,4 ± 0,4	Ortiz et al. (2006)
<i>Durvillaea antarctica</i> chilena (hojas) ^b	77,39 ± 1,43	17,57 ± 2,65	1,71 ± 0,19	0,80 ± 0,06	79,93 ± 2,82 ^d	4,11 ± 0,79	Uribe et al. (2017)

^a Resultados son el promedio de análisis por cuadruplicado ± SD, expresados en % peso seco.
^b Resultados son el promedio de análisis por triplicado ± SD. La humedad se expresó en g/100 g peso fresco, mientras que el resto de los parámetros en g/100 g materia seca.
^c Calculado por diferencia, incluye fibra dietética.
^d Calculado por diferencia.
^e Determinado por la razón de fibra dietética y carbohidratos totales contenidos en *Durvillaea antarctica* (tallos) (Ortiz et al., 2006).

Fuente: Ortiz et al. (2006) y Uribe et al. (2017)

Los carbohidratos contenidos en las algas tienen una alta concentración, entre un 20 a 70%, los cuales se encuentran como polisacáridos estructurales en la pared celular de las algas, de almacenamiento y funcionales. Principalmente destaca la fracción de fibra que poseen, la cual varía entre 36 a 60% de su materia seca, destacándose la fibra dietética soluble (Quitral et al., 2012). Las algas pardas tienen polisacáridos lineales denominados alginatos, los cuales se encuentran en la pared celular de estas. Este tipo de polisacárido está compuesto por cadenas lineales de polímeros compuesto por monómeros de ácido manurónico y ácido gulurónico. Los usos del alginato son principalmente a nivel de la industria, pero su consumo directo se ha asociado a diversos beneficios, tales como disminuir los niveles de colesterol y glucosa en sangre, actividad prebiótica, prevención del cáncer, reducción de la presión arterial, entre otros (Peso-Echarri et al., 2012).

La proteína vegetal contenida en las algas es considerada de alto valor biológico dado el perfil de aminoácidos que presenta (tabla 5). En el caso de la especie *Durvillaea antarctica*, el perfil de aminoácidos da cuenta que es alta en glicina, ácido glutámico y leucina (Uribe et al. 2018), pero limitante en aminoácidos azufrados como metionina y cistina (Ortiz, 2011). La cantidad de aminoácidos esenciales encontrados en una muestra fresca de *Durvillaea antarctica* fue de 578 mg/g proteína, lo cual correspondió al 43% de los aminoácidos de la proteína del alga (Uribe et al., 2018).

Tabla 5. Contenido de aminoácidos en *Durvillaea antarctica* (hojas y tallo) expresado en mg/100 g de alga seca

Aminoácidos	<i>Durvillaea antarctica</i> (hojas) (mg/100 g de alga seca)	<i>Durvillaea antarctica</i> (tallo) (mg/100 g de alga seca)
Ac. Aspártico	936,4 ± 10,2	2953,6 ± 14,1
Ac. Glutámico	1642,7 ± 29,9	1485,9 ± 8,3
Serina	552,7 ± 12,4	385,6 ± 4,8
Histidina	867,1 ± 9,9	1743,0 ± 10,7
Glicina	715,3 ± 14,1	441,7 ± 6,3
Treonina	626,9 ± 15,6	421,4 ± 9,4
Arginina	225,6 ± 8,1	229,8 ± 7,5
Alanina	780,0 ± 10,3	1252,9 ± 9,0
Prolina	0,5 ± 0,1	0,3 ± 0,0
Tirosina	264,0 ± 5,8	123,1 ± 3,6
Valina	274,4 ± 11,2	281,4 ± 5,1
Metionina	170,4 ± 9,7	631,7 ± 7,7
Cistina	13,9 ± 4,8	148,7 ± 4,3
Isoleucina	437,7 ± 5,9	241,6 ± 8,2
Leucina	779,5 ± 14,0	419,7 ± 7,1
Fenilalanina	478,6 ± 7,9	297,4 ± 6,5
Lisina	550,1 ± 13,0	294,9 ± 9,6
Total aminoácidos esenciales	4198,6 ± 92,0	4479,8 ± 68,6

Fuente: Bozzo y Ríos (2005)

El contenido de lípidos en algas fluctúa entre el 1 al 5% en base seca (Quitral et al., 2012). En el caso de la *Durvillaea antarctica*, existe un menor porcentaje de materia grasa en las hojas del alga en comparación con el tallo, 0,8% y 4,3% respectivamente (Ortiz, 2011). En el caso de *Durvillaea antarctica* (hojas) predominan los ácidos grasos monoinsaturados, a diferencia de *Durvillaea antarctica* (tallo) donde hay una mayor proporción de ácidos grasos saturados (tabla 6). Dentro de los ácidos grasos monoinsaturados, destaca el ácido graso oleico (25,36% en las hojas del alga y 25,86% en el tallo), mientras que dentro de los ácidos grasos saturados predomina el ácido palmítico (12,12% en las hojas del alga y 18,35% en el tallo). En el caso de los ácidos grasos poliinsaturados, su contenido es mayor en *Durvillaea antarctica* (hojas), en donde destaca el ácido graso ω 6 (22% en las hojas y 15,65% en el tallo) y ω 3 (10,77% en las hojas y 3,79% en el tallo) (tabla 6) (Ortiz, 2011).

Tabla 6. Contenido de ácidos grasos en *Durvillaea antarctica* (hojas y tallo) en estado fresco

Ácidos grasos	<i>Durvillaea antarctica</i> (hojas) (% ésteres metílicos)	<i>Durvillaea antarctica</i> (tallo) (% ésteres metílicos)
Total saturados	25,84 ± 1,92	36,28 ± 2,90
Total monoinsaturados	38,11 ± 0,12	29,21 ± 1,13
Total poliinsaturados	34,42 ± 1,90	29,23 ± 2,20
Total poliinsaturados ω6	22,00 ± 0,22	15,65 ± 1,09
Total poliinsaturados ω3	10,77 ± 0,01	3,79 ± 0,12
Razón ω6/ω3	2,00	4,10

Fuente: Ortiz et al. (2006)

2.2.1.1 Cambios en la composición química post procesamiento

Cuando las algas son sometidas a secado, cambian su composición química, lo cual dependerá de la temperatura aplicada y tipo de secado utilizado. En la tabla 7, se muestra la composición química de algas sometidas a procesos de deshidratación y liofilizadas.

Tabla 7. Composición química en *Durvillaea antarctica* deshidratada y liofilizada

Alga	Humedad	Cenizas	Proteínas	Lípidos	Carbohidratos	ELN (Extracto Libre de Nitrógeno)	Fibra dietética	Referencia
<i>Durvillaea antarctica</i> chilena seca (tallos) ^a	9,2	25,5	9,7	0,1	51,5 ^d	s/i	8,9	Mateluna et al. (2020)
<i>Durvillaea antarctica</i> chilena liofilizada (s/i) ^b	8,15 ± 0,014	26,06 ± 0,031	10,79 ± 0,08	0,43 ± 0,022	54,57 ^e	s/i	s/i	Caballero et al. (2021)
<i>Durvillaea incurvata</i> * chilena liofilizada (talo) ^c	9,5 ± 1,8	32,2 ± 14,5	6,5 ± 1,1	1,9 ± 0,3	s/i	53,1 ± 13,3 ^d	4,3 ± 1,0	Véliz et al. (2023)

^a Resultados son el promedio de análisis por duplicado, expresados en g/100 g peso seco.
^b Resultados son el promedio de análisis por triplicado ± SD, expresados en g/100 g macroalga.
^c Resultados son el promedio de análisis por triplicado ± SD, expresados en %peso seco.
^d Calculado por diferencia.
^e Calculado por diferencia, incluyendo fibra dietética.
s/i: Sin información.
*: *Durvillaea incurvata* es el nombre actual de la *Durvillaea antarctica*.

Fuente: Mateluna et al. (2020), Caballero et al. (2021) y Véliz et al. (2023)

Uribe et al. (2017) sometieron a secado por aire caliente a diferentes temperaturas (40, 50, 60, 70 y 80°C) muestras de esta alga parda, dentro de los resultados se observaron cambios en la composición proximal del alga en estado fresco y sometido a secado (tabla 8). Dentro de los resultados establecidos, indicaron que la humedad inicial del alga en estado fresco fue de $77,39 \pm 1,43\%$ peso fresco, la cual fue disminuyendo a medida que la temperatura de secado fue mayor, es así como la menor humedad se obtuvo con el secado a 70°C donde fue $5,53 \pm 0,14\%$ peso fresco. De esta misma forma, sucede la misma situación con la actividad de agua, la cual inicialmente fue de $0,976 \pm 0,019$. En el caso de fibra cruda y carbohidratos totales, también se redujeron por el proceso de secado ($p < 0,05$), mientras que la disminución de algunos macronutrientes pudiese asociarse por la aplicación de calor.

Por otra parte, los resultados mostraron un incremento significativo en el contenido de grasas ($p < 0,05$) desde las muestras frescas a deshidratadas, a excepción del secado a 50°C. También las cenizas y proteína cruda tuvieron un incremento significativo ($p < 0,05$) aparentemente por una concentración del contenido de nutrientes producto de la extracción de humedad del alga. Durante el tratamiento de secado, el contenido de aminoácidos puede mejorar, reducir o mantenerse, dependiendo de cada aminoácido propiamente tal, así como las condiciones de secado. Uribe et al. (2018) establecieron en su estudio que no hubo cambios significativos en el perfil de aminoácidos en muestras de *Durvillaea antarctica* luego de someterlas a secado con aire caliente a diferentes temperaturas, entre 40 a 80°C. Sin embargo, a una temperatura de secado de 60°C, fueron los valores menores de aminoácidos. De cualquier manera, el alga mantiene sus proteínas de alto valor biológico posterior al secado (Uribe et al., 2018). Por otra parte, a diferencia de lo anteriormente expuesto, hay dos aminoácidos que aumentaron su cantidad durante el tratamiento de secado, los cuales fueron alanina a 70°C y lisina a 40, 50 y 70°C (Uribe et al., 2018).

Tabla 8. Composición proximal de *Durvillaea antarctica* a diferentes temperaturas de secado expresados en base seca

Parámetros (g/100 g materia seca)	Fresco	40°C	50°C	60°C	70°C	80°C
Humedad ^f	77,39 ± 1,43 ^a	14,98 ± 0,31 ^b	9,33 ± 0,21 ^c	8,58 ± 0,03 ^c	5,53 ± 0,14 ^d	6,38 ± 0,08 ^d
Grasas	0,80 ± 0,06 ^{ab}	0,96 ± 0,05 ^{cd}	0,69 ± 0,06 ^a	0,91 ± 0,09 ^{bc}	0,94 ± 0,10 ^{cd}	1,04 ± 0,05 ^d
Cenizas	17,57 ± 2,65 ^a	21,85 ± 1,47 ^b	23,65 ± 1,02 ^{bc}	23,59 ± 0,38 ^{bc}	24,73 ± 1,21 ^c	23,32 ± 0,57 ^{bc}
Proteína cruda	1,71 ± 0,19 ^a	7,88 ± 0,31 ^c	7,75 ± 0,06 ^{bc}	7,47 ± 0,04 ^b	8,02 ± 0,12 ^c	7,57 ± 0,13 ^b
Fibra cruda	4,11 ± 0,79 ^a	3,26 ± 0,24 ^b	2,61 ± 0,04 ^{cd}	2,21 ± 0,16 ^d	2,31 ± 0,25 ^d	3,17 ± 0,21 ^{bc}
Carbohidratos totales ^g	79,93 ± 2,82 ^a	69,31 ± 1,13 ^b	67,91 ± 1,03 ^{bc}	68,02 ± 0,32 ^{bc}	66,31 ± 1,08 ^c	68,08 ± 0,63 ^{bc}
Actividad de agua (a _w) ^h	0,976 ± 0,019 ^a	0,598 ± 0,004 ^b	0,396 ± 0,003 ^c	0,375 ± 0,003 ^c	0,260 ± 0,015 ^d	0,326 ± 0,007 ^e

^{a-e} Valores en la misma materia prima con diferentes superíndices indican diferencias significativas (p<.05) para cada muestra.
^f Expresado como g/100 g peso fresco, el resto de los parámetros como g/100g materia seca.
^g Calculado por diferencia.
^h Adimensional.

Fuente: Uribe et al. (2017)

2.2.2 Fibra dietética en *Durvillaea antarctica*

El alto contenido de polisacáridos se asocia a un alto contenido de fibra dietética. En ese sentido, tanto las hojas como tallo de *Durvillaea antarctica* predomina la fibra dietética insoluble (tabla 9). Uribe et al. (2018), estableció que de una muestra en estado fresco de *Durvillaea antarctica* (hojas), el contenido de fibra dietética insoluble fue 43,3 ± 0,5 g/100 g materia seca, lo cual correspondió al 76% del total de fibra dietética total de la muestra. Sin embargo, la gran relevancia de la fibra dietética en este tipo de alimento es el gran porcentaje de fibra dietética soluble que poseen (Ortiz et al., 2006) y cuyo consumo se asocia a beneficios tales como disminuir los niveles de colesterol LDL y absorción de carbohidratos simples en sangre, aumentan la saciedad y por ende se reduce la cantidad de ingestión de alimentos controlando el peso corporal (Almeida-Alvarado et al., 2014).

Tabla 9. Contenido de fibra dietética en *Durvillaea antarctica* (hojas y tallo) en estado fresco expresados en base seca

Alga	Fibra dietética soluble	Fibra dietética insoluble	Fibra dietética total	Referencia
<i>Durvillaea antarctica</i> chilena (hojas) ^a	27,7 ± 1,2	43,7 ± 0,3	71,4 ± 1,5	Ortiz et al. (2006)
<i>Durvillaea antarctica</i> chilena (tallos) ^a	24,2 ± 2,5	32,2 ± 0,7	56,4 ± 0,4	Ortiz et al. (2006)
<i>Durvillaea antarctica</i> chilena (hojas) ^b	13,7 ± 1,2	43,4 ± 0,5	57,1 ± 0,7	Uribe et al. (2018)

^a Resultados son el promedio de análisis por cuadruplicado ± SD, expresados en %peso seco.
^b Resultados expresados en g/100 g materia seca.

Fuente: Ortiz et al. (2006) y Uribe (2018)

2.2.2.1 Cambios en la fibra dietética post procesamiento

Respecto al contenido de fibra dietética, la tabla 10 muestra el contenido de la especie *Durvillaea antártica* en su estado fresco (control) y deshidratado a diferentes temperaturas de secado, respectivamente. Uribe et al. (2018) establecieron que no existió cambios significativos en el contenido total de fibra dietética del alga sometida entre 40 y 80°C, a excepción de lo que se observa con la fibra dietética soluble cuando el alga fue sometida a 70°C. Lo anterior pudo haber ocurrido debido a una mayor susceptibilidad del alga a la destrucción química de la fibra por el largo período de secado (220 min).

Tabla 10. Contenido de fibra dietética en *Durvillaea antarctica* a diferentes temperaturas de secado expresados en base seca

Temperatura (°C)	Fibra dietética soluble (g/ 100 g ms)	Fibra dietética insoluble (g/ 100 g ms)	Fibra dietética total (g/ 100 g ms)
Control	13,7 ± 1,2 ^a	43,4 ± 0,5 ^a	57,1 ± 0,7 ^a
40	11,5 ± 0,0 ^a	45,9 ± 0,2 ^{ab}	57,4 ± 0,2 ^a
50	11,8 ± 1,2 ^a	46,3 ± 1,2 ^{ab}	58,1 ± 0,0 ^a
60	11,7 ± 1,2 ^a	46,3 ± 2,3 ^b	58,0 ± 1,1 ^a
70	8,50 ± 1,2 ^b	45,9 ± 0,8 ^{ab}	54,4 ± 2,0 ^b
80	13,2 ± 0,2 ^a	45,7 ± 0,8 ^{ab}	58,9 ± 1,0 ^a

Las letras diferentes en la misma columna significan diferencia significativa (p< 0,05)

Fuente: Uribe et al. (2018)

2.2.3 Compuestos bioactivos en *Durvillaea antarctica*

Un compuesto bioactivo es aquel “que tiene una actividad biológica, relacionada con su capacidad para modular uno o más procesos metabólicos, lo que resulta en la promoción de mejores condiciones de salud” (Angiolillo et al., 2015). Entre estos compuestos bioactivos se encuentran los fitoquímicos, los cuales son producidos por las algas con un rol protector frente a condiciones adversas que pongan en riesgo su sobrevivencia, tales como temperatura, radiación UV, falta de nutrientes, concentración de salinidad, entre otros (Cassani et al., 2020). Existen seis grupos principales de fitoquímicos: Compuestos fenólicos, alcaloides, compuestos que contienen nitrógeno, compuestos organosulfurados, fitoesteroles y carotenoides. Los compuestos fenólicos son los más estudiados (Erpel et al., 2020).

El contenido de polifenoles totales (CPT) varía en las algas y depende de factores tales como la luz solar y el clima, por ende, algas de un clima más templado tendrían un mayor contenido de polifenoles (Uribe et al., 2018). Uribe et al. (2018), establecieron que el contenido de polifenoles totales de muestras en estado fresco de *Durvillaea antarctica* (hojas) fue de 660 ± 34 mg EAG/ 100 g materia seca, mientras que Ortiz (2011) estableció que las hojas y tallo del alga en estado fresco presentaban 55 y 48,72 mg ácido gálico/ 100 g alga fresca respectivamente (tabla 11). Pacheco et al. (2020), realizaron la extracción de polifenoles de extractos de algas chilenas pardas y rojas a través del método convencional con acetona y no convencional con etanol mediante extracción de líquido caliente a presión (HPLE). Dentro de las algas pardas se analizaron las especies *Durvillaea antarctica* y *Lessonia spicata* (Huiro negro). Los resultados del estudio mostraron que la especie *Durvillaea antarctica* fue la que presentó el contenido de polifenoles totales en extracto etanólico y con acetona más alto en comparación al resto de las algas en estudio con un contenido de $7,4 \pm 0,2$ mg EAG/ 100 g alga deshidratada y $6,7 \pm 0,7$ mg EAG/ 100 g alga deshidratada, respectivamente (tabla 12).

Tabla 11. Concentración de polifenoles totales en *Durvillaea antarctica*

Alga	Concentración de ácido gálico mg/L, en extracto etanólico	Concentración de ácido gálico mg/100 g alga fresca	Concentración de ácido gálico mg/100 g alga deshidratada
<i>Durvillaea antarctica</i> (hojas)	130	55,00	198,57
<i>Durvillaea antarctica</i> (tallo)	127	48,72	273,68

Fuente: Ortiz (2011)

Tabla 12. Contenido total de polifenoles y capacidad antioxidante en extracto de algas

Especie de alga	Tipo	Polifenoles totales mg EAG/g alga deshidratada		DPPH $\mu\text{mol ET/g}$ alga deshidratada		ORAC $\mu\text{mol ET/g}$ alga deshidratada	
		Etanol	Acetona	Etanol	Acetona	Etanol	Acetona
<i>Durvillaea antarctica</i>	Parda	7,4 \pm 0,2 ^b	6,7 \pm 0,7 ^a	48,5 \pm 4,2 ^a	27,8 \pm 2,2 ^a	680,1 \pm 11,6 ^a	64,7 \pm 0,0 ^a
<i>Gelidium sp.</i>	Roja	3,2 \pm 0,3 ^a	3,4 \pm 0,2 ^a	4,8 \pm 0,4 ^b	4,7 \pm 0,2 ^c	277,8 \pm 15,5 ^{bc}	6,9 \pm 0,5 ^c
<i>Lessonia spicata</i>	Parda	3,3 \pm 0,2 ^b	3,8 \pm 0,1 ^a	6,6 \pm 0,7 ^a	10,7 \pm 0,6 ^a	448,3 \pm 33,4 ^a	21,3 \pm 1,3 ^b
<i>Nothogenia sp.</i>	Roja	4,8 \pm 0,3 ^b	6,0 \pm 0,3 ^a	5,4 \pm 0,3 ^{ab}	6,9 \pm 0,1 ^{bc}	371,6 \pm 12,3 ^{ab}	18,1 \pm 0,9 ^b
<i>Mazzaella laminarioides</i>	Roja	1,9 \pm 0,1 ^a	3,1 \pm 0,1 ^a	2,2 \pm 0,1 ^c	7,05 \pm 0,8 ^b	208,1 \pm 10,4 ^c	8,7 \pm 0,6 ^c
<i>Pyropia sp.</i>	Roja	2,2 \pm 0,0 ^b	3,1 \pm 0,1 ^a	6,5 \pm 0,4 ^{ab}	10,6 \pm 0,9 ^a	455,3 \pm 3,4 ^a	30,7 \pm 2,9 ^a

Diferentes letras indican las diferencias estadísticamente significativas para la prueba de rango múltiple de Tukey con un 95% de confianza, en cada columna.

Fuente: Pacheco et al. (2020)

Los polifenoles característicos y exclusivos de las algas pardas son los florotaninos, compuestos bioactivos asociados a posibles beneficios en la salud humana, tales como antidiabético, anticancerígeno y antibacteriano (Erpel et al., 2020), antiinflamatorio y antialérgico (Cassani et al., 2020). Este tipo de polifenol está compuesto por el monómero floroglucinol. De acuerdo con el tipo de enlace entre las unidades del monómero y el contenido de grupos hidroxilos, se establecen seis clases (tabla 13) (Erpel et al., 2023). El contenido de florotaninos en las algas puede alcanzar hasta el 30% de su peso seco y quedará sujeto a factores intrínsecos del alga como edad, morfología, tasa de crecimiento, entre otros, así como a condiciones ambientales tales como temperatura, radiación UV, nutrientes, entre otros. Los florotaninos solubles se encuentran en los físcodos del alga, mientras que una pequeña parte de los florotaninos insolubles se encuentran en la pared celular de estas asociados a proteínas y alginato (Erpel et al., 2020).

Tabla 13. Clases de florotaninos

Clase Florotanino	Enlace
Fucoles	Arilo-arilo
Floretoles	Arilo-éter;
Fucofloretoles	Aril-arilo y aril-éter;
Fuhaloles	Éter dispuesto en orto y para con grupos OH adicionales;
Carmaloles	Derivados de floretoles con un resto de dibenzodioxina;
Eckols	Elementos de dibenzodioxina sustituidos por un grupo fenoxilo en C-4

Fuente: Erpel et al. (2023)

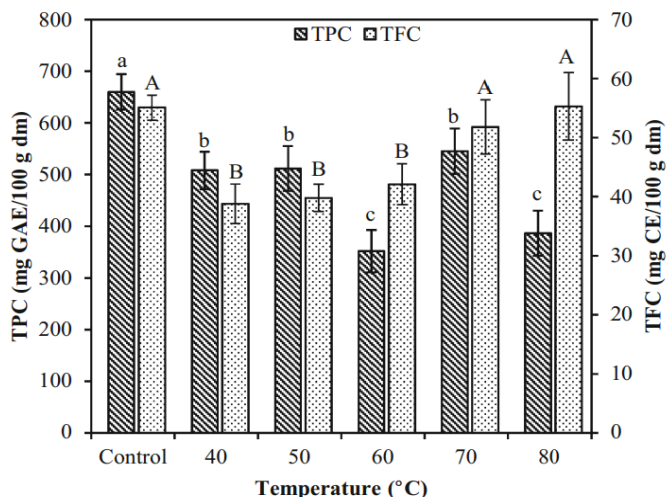
La capacidad antioxidante de un alimento se encuentra establecida por la interacción de las diferentes moléculas que componen el producto (Mercado-Mercado et al., 2013). Los radicales libres son átomos o un grupo de átomos que presentan un electrón libre, lo cual lo hace muy reactivo e inestable, por ende, busca lograr la estabilidad electroquímica mediante la captación de un electrón de moléculas estables (Avello y Suwalsky, 2006). En los humanos, el cuerpo genera radicales libres en respuesta a procesos fisiopatológicos como inflamación, metabolismo de compuestos extraños o radiación. La presencia de estos radicales libres influye en moléculas orgánicas como ácidos nucleicos, lípidos y proteínas. Ante lo expuesto, radica la importancia de los compuestos antioxidantes, los cuales tienen por objetivo retardar o prevenir la oxidación de moléculas biológicas estables de importancia, neutralizando los radicales libres u otras especies reactivas de oxígeno (Benítez-Estrada et al., 2020). En el caso de las algas, habitualmente se evalúa su contenido de polifenoles totales (CPT) y capacidad antioxidante. Uribe et al. (2018) determinaron que la capacidad antioxidante de *Durvillaea antarctica* (hojas) en estado fresco fue de 2257 ± 20 $\mu\text{mol ET}/100$ g materia seca y 8278 ± 140 $\mu\text{mol ET}/100$ g materia seca para DPPH y ORAC, respectivamente. Dentro de los resultados obtenidos por Pacheco et al. (2020), se observó que con relación a la capacidad antioxidante hubo diferencias estadísticas significativas entre las especies de algas estudiadas ($p < 0,05$). Las algas pardas fueron las que presentaron la actividad antioxidante mayor en comparación a las otras especies, principalmente la especie *Durvillaea antarctica* evaluada a través de DPPH ($48,5 \pm 4,2$ $\mu\text{mol ET}/\text{g}$ alga deshidratada, etanol; $27,8 \pm 2,2$ $\mu\text{mol ET}/\text{g}$ alga deshidratada, acetona) y

ORAC ($680,1 \pm 11,6 \mu\text{mol ET/g}$ alga deshidratada, etanol; $64,7 \pm 0,0 \mu\text{mol ET/g}$ alga deshidratada, acetona) (tabla 12).

2.2.3.1 Cambios en el contenido de compuestos bioactivos post procesamiento

El contenido de polifenoles totales (CPT) varía en las algas y depende de factores tales como la luz solar y el clima, por ende, algas de un clima más templado tendrían un mayor contenido de polifenoles. Uribe et al. (2018) sometieron a secado por aire caliente (40, 50, 60, 70 y 80°C) muestras de *Durvillaea antarctica*, cuyos resultados mostraron que el alga al ser sometida a 40 y 50°C, tuvo una disminución en el CPT de 23 y 22%, respectivamente. En el caso del secado a 60°C, esta fue la temperatura a la cual el alga presentó la mayor disminución de CPT de un 47%, pero no fue significativamente distinta a lo ocurrido a 80°C (41%). En el caso de la temperatura a 70°C, la reducción fue de un 17%, lo cual no fue significativo en comparación a lo ocurrido a 40 y 50°C. La mayor disminución de CPT a 60°C podría atribuirse a la intensidad y prolongación del secado, lo cual sería responsable de la pérdida de estos compuestos por ser inestables, a cambios en su composición química o estar asociados a proteínas (figura 3).

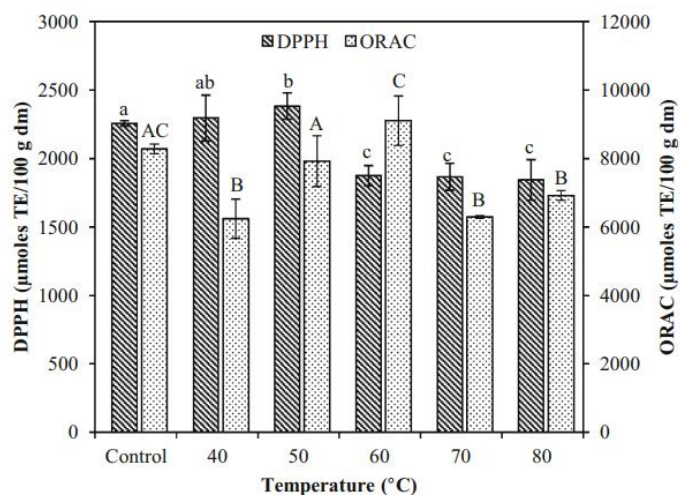
Respecto a la actividad antioxidante, Uribe et al. (2018) observaron que esta tuvo una disminución significativa a temperaturas sobre los 70°C ($p < 0,05$). En el caso del análisis por DPPH, no hubo una pérdida significativa de la capacidad antioxidante a los 40 y 50°C ($p > 0,05$) a diferencia de lo ocurrido con las otras temperaturas. Respecto al método por ORAC, no hubo diferencias significativas de la capacidad antioxidante de las muestras sometidas a 50 y 60°C ($p > 0,05$) en comparación a las muestras control ($8278 \pm 140 \mu\text{mol ET/100 g}$ materia seca), a diferencia de lo ocurrido a las otras temperaturas de secado. En el estudio establecieron que podría existir haber una relación entre los CPT y flavonoides, y la capacidad antioxidante (figura 4).



Diferentes letras minúsculas o mayúsculas en columnas del mismo sombreado indican una diferencia significativa ($p < 0,05$)

Figura 3. Polifenoles totales en *Durvillaea antarctica* sometida a diferentes temperaturas de secado

Fuente: Uribe et al. (2018)



Diferentes letras minúsculas o mayúsculas en columnas del mismo sombreado indican una diferencia significativa ($p < 0,05$)

Figura 4. Capacidad antioxidante en *Durvillaea antarctica* sometida a diferentes temperaturas de secado

Fuente: Uribe et al. (2018)

2.3 Post procesamiento

Los diferentes métodos de post procesamiento afectan la estabilidad del modelo impreso en 3D, así como cambios en el estado y color de la estructura, los cuales habitualmente son en su mayoría cambios negativos en el producto. Dentro de los cambios que pueden existir post procesamiento, son deformaciones de la estructura debido a la separación entre los filamentos, formación de grietas y contracción o expansión del volumen (Chen et al., 2022). El secado o deshidratación es uno de los métodos más utilizados en la industria alimentaria, el cual permite disminuir la actividad de agua disponible para las reacciones de deterioro de los alimentos, influyendo también en el peso y volumen de estos, y permite obtener materias primas que son utilizadas para formulaciones de nuevos productos. Sin embargo, dentro de las desventajas de este método se encuentran cambios indeseados como modificaciones en el tamaño, forma, color, textura, sabor y aroma del producto original (Maupoey et al., 2020). En el caso de las estructuras impresas en 3D, no es diferente a lo descrito previamente, el secado generará cambios en la forma, color y textura de las estructuras (Liu et al., 2021).

Para llevar a cabo el secado, existen diferentes técnicas de eliminación de agua, ya sean métodos mecánicos y fisicoquímicos. Dentro de estas técnicas se encuentran: Prensado, centrifugación, evaporación superficial, ósmosis, liofilización, absorción, adsorción y congelación (Maupoey et al., 2020). Los métodos de secado utilizados en el estudio fueron por evaporación superficial (horno y aire forzado) y liofilización. La evaporación superficial o secado por aire caliente, consiste en someter a un producto a una corriente de aire caliente, generando que el líquido que contiene se evapore (cambio de estado de líquido a gas a través de la evaporación). En el caso de la liofilización, el agua del alimento se elimina a través de la sublimación (cambio de estado de sólido a gas), ya que previamente el alimento se congela para separar el agua de este y luego se sublima (Maupoey et al., 2020).

2.3.1 Secado por horno

Se lleva a cabo en un tipo de secador directo o por convección, el cual consta de dos pisos o niveles. En la parte inferior del equipo o primer nivel, se calienta el aire de secado para que luego pase al segundo nivel de manera natural o forzada en donde se encuentra el producto a deshidratar (figura 5). Son equipos de fácil uso (Maupoey et al., 2020).

2.3.2 Secado por aire forzado

Se lleva a cabo en un tipo de secador de túnel por convección forzada, con flujo paralelo. El producto se dispone en un sistema estacionario o batch para recibir el flujo de masa de aire de manera paralela para someter a secado (figura 6).

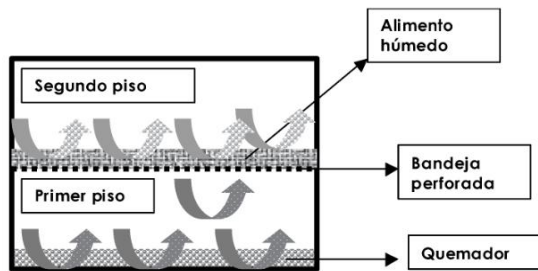


Figura 5. Esquema funcionamiento de un secador de horno

Fuente: Maupoey et al. (2020)

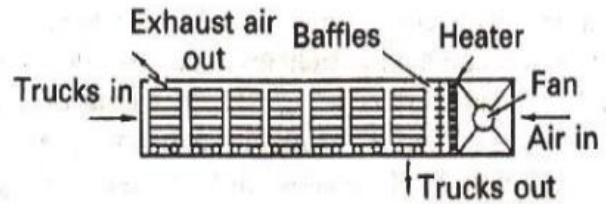


Figura 6. Esquema funcionamiento de un secador de túnel

Fuente: Maupoey et al. (2020)

La medición de la humedad (X_w) que se va perdiendo en función de la variable tiempo (t), puede ser representada mediante una gráfica denominada curva de secado. La figura 7 muestra una curva de secado típica con tres fases o períodos:

- **Período de inducción o de velocidad de secado creciente (A):** Es la etapa inicial en la cual se calienta el producto y aumenta la temperatura de interfase.
- **Período de velocidad de secado constante (B):** Existe una mayor velocidad en que el agua del interior del producto llega a la superficie de este, en comparación a la velocidad de eliminación del agua superficial, por lo que siempre esta última se mantiene mojada. Existe una temperatura constante que busca eliminar el agua, llegando un momento en que la velocidad con la que llega el agua desde el interior del producto hacia el exterior es menor a la velocidad de evaporación del agua superficial. Desde este punto, parte del calor se invierte en calentar el producto sólido y la humedad en este punto se denomina humedad crítica.
- **Período de velocidad de secado decreciente (C):** La humedad del producto sigue disminuyendo hasta llegar a la humedad de equilibrio.

2.3.3 Secado por liofilización

Se lleva a cabo en un tipo de secador indirecto. El proceso de liofilización permite mantener mínimas variaciones de características organolépticas, físicas y químicas en comparación al alimento previo al proceso. Es de mayor complejidad a los otros dos mencionados previamente y consiste en tres etapas (figura 8) (Ramírez, 2006):

- **Congelación o enfriamiento:** El producto se somete a congelación de la totalidad de su contenido de agua libre para asegurar la siguiente etapa. El tiempo de duración de la congelación dependerá de los factores de cantidad, concentración y naturaleza del producto que se liofilizará. La temperatura a la cual se congela va entre -50 a -80°C .

- **Secado primario por sublimación del hielo:** Se produce el cambio de fase de hielo a vapor (sublimación) de la mayor parte del agua congelada. En esta etapa se aplica el vacío, lo cual acelera el proceso de secado.

- **Secado secundario por remoción de agua:** Pretende eliminar el remanente de vapor de agua resultante de la evaporación del agua aún ligada al producto. Se puede lograr un producto con una humedad inferior al 1%.

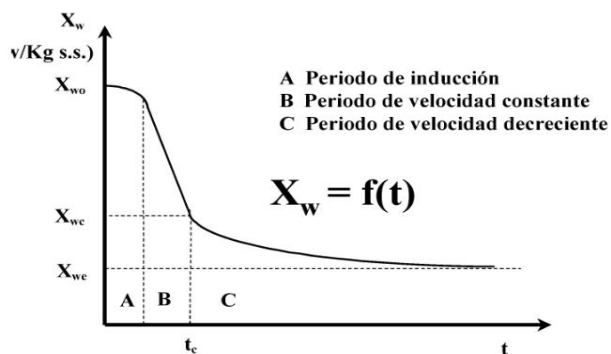


Figura 7. Curva de secado típica de materiales húmedos.
Fuente: Maupoey et al. (2020)

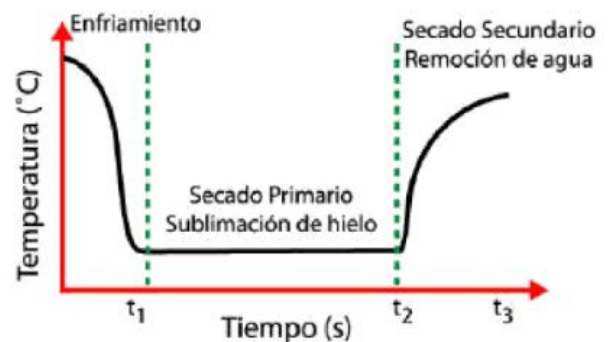


Figura 8. Etapas proceso liofilización
Fuente: Ramírez (2006)

2.3.4 Curvas de secado en algas

Existen estudios previos que dan cuenta de las curvas de secado de algas. Uribe et al. (2017) sometieron a secado por aire caliente *Durvillaea antarctica* a 40, 50, 60, 70 y 80°C en un secador a convección con un flujo de aire constante de $1,5\pm 0,2$ m s⁻¹ y carga densidad de $1,9\pm 0,1$ kg m⁻². Sus resultados fueron que la humedad disminuyó con el aumento de la temperatura y tiempo de secado. Cuando se sometió el alga a la más alta temperatura (80°C), su proceso de secado fue más rápido (180 min) en comparación a la temperatura de secado más baja (40°C), para la cual se extendió el tiempo requerido (250 min) para lograr un equilibrio en el contenido de la humedad del producto (figura 9a y 9b). Por otra parte, al analizar las tendencias de las curvas de secado a diferentes temperaturas, se observan gráficas que carecen de un período de velocidad constante y se realizó la suposición de que el proceso de secado ocurrió en el período de velocidad decreciente. El agua ligada a los componentes alimentarios es más difícil de eliminar dado que en primera instancia debe moverse desde el interior del alimento hacia la superficie de este, además, debe traspasar una capa superficial seca, lo cual limita la velocidad de secado.

Ante lo expuesto, la difusión es el mecanismo físico más probable que estaría presente en el tratamiento para poder movilizar la humedad en las algas.

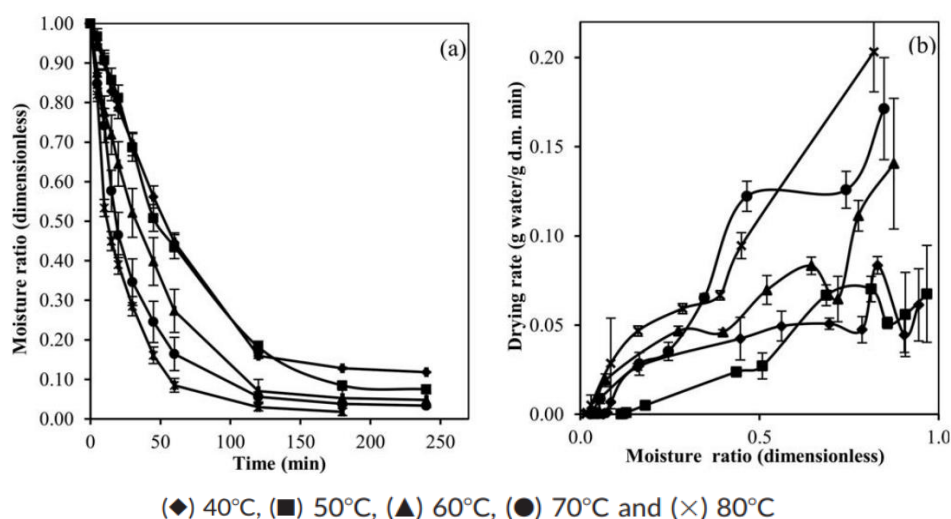


Figura 9. (a) Comportamiento curva de secado y (b) Curvas experimentales de velocidad de secado de *Durvillaea antarctica* a 40, 50, 60, 70 y 80°C
Fuente: Uribe et al. (2017)

Por otra parte, Lemus et al. (2008) sometieron a secado por aire caliente *Gracilaria chilensis* (alga roja) a 40, 50, 60 y 70°C en un secador a convección con una velocidad de aire constante de $2,0\pm 0,2$ m/s. Sus resultados fueron similares a lo concluido por Uribe et al. (2017), ya que la humedad disminuyó de manera exponencial con las temperaturas utilizadas. El tiempo de secado es menor cuando el alga fue sometida a la temperatura máxima de 70°C utilizada en el estudio (200 min), en comparación al resto de las temperaturas 40, 50 y 60°C (450, 350 y 300 min) (figura 10).

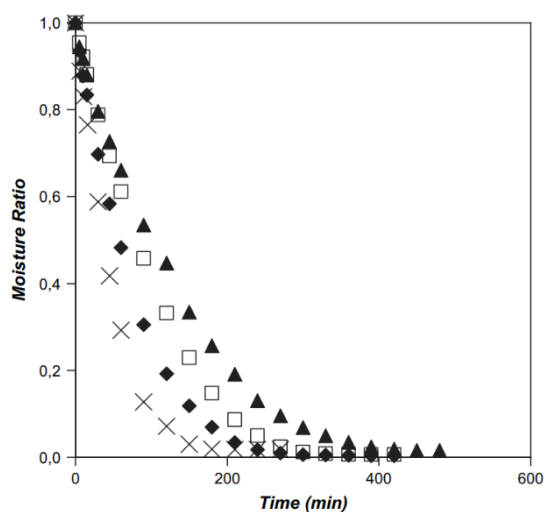


Figura 10. Comportamiento curva de secado de *Gracilaria chilensis* a 40, 50, 60 y 70°C
Fuente: Lemus et al. (2008)

Dado que el proceso de secado depende de diferentes variables, principalmente el tiempo y temperatura de secado, es necesario poder optimizar el proceso y utilizar modelos predictivos de estas variables, por lo cual se aplican modelos empíricos matemáticos para controlar y optimizar el proceso de secado sobre un producto. La mayoría de los modelos matemáticos son ecuaciones derivadas del modelo difusional de la segunda ley de Fick para diferentes geometrías, el cual considera que el agua de un sólido es transportada desde su interior hacia la superficie mediante difusión. Dentro de los modelos más utilizados y comunes se encuentra el de Newton, el cual ha sido utilizado en experiencias de secado en algas como *Gracilaria chilensis* y *Durvillaea antarctica* previamente (Vega et al., 2007 y Uribe et al., 2017).

2.6 Hipótesis

El secado por liofilización preserva en mayor medida el contenido de polifenoles totales y capacidad antioxidante en comparación a la condición óptima de temperatura de los métodos de secado por horno y aire forzado de un snack impreso en 3D en base al alga Cochayuyo (*Durvillaea Antarctica*) y harina de arroz.

2.7 Objetivo general

Comparar los efectos de los diferentes métodos de secado sobre las propiedades estructurales, contenido de polifenoles totales y capacidad antioxidante de un snack obtenido mediante impresión 3D en base al alga Cochayuyo (*Durvillaea Antarctica*) y harina de arroz.

2.8 Objetivos específicos

O.E.1. Determinar la cinética de secado experimental y modelada del snack impreso 3D en base a Cochayuyo (*Durvillaea antarctica*) y harina de arroz bajo el método de secado por horno a las diferentes temperaturas en estudio (40, 60 y 80°C).

O.E.2. Determinar la condición óptima de temperatura de los métodos de secado por horno y aire forzado que mejor preserve las propiedades estructurales de forma, color superficial final y textura del snack impreso 3D en base al alga Cochayuyo (*Durvillaea antarctica*) y harina de arroz.

O.E.3. Determinar la composición proximal del snack impreso 3D en base a Cochayuyo (*Durvillaea antarctica*) y harina de arroz en estado fresco.

O.E.4. Evaluar el contenido de polifenoles totales y capacidad antioxidante del snack obtenido a partir de impresión 3D en base al alga Cochayuyo (*Durvillaea antarctica*) y harina de arroz en estado fresco, liofilizado, y secado por horno y aire forzado a la condición óptima de temperatura.

2.9 Metodología

2.9.1 Materia prima

Las materias primas que se utilizaron en el estudio fueron harina de arroz marca Tucapel y el alga Cochayuyo (*Durvillaea antarctica*) en su estado deshidratado marca Agro Uno, las cuales fueron adquiridas en supermercados de la región Metropolitana y almacenadas a temperatura ambiente en el Laboratorio de Ingeniería de Procesos de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas de la Universidad de Chile. En el caso del alga deshidratada, debió pasar por un proceso de doble molienda para transformarla en harina de Cochayuyo, para lo cual se tomó el alga deshidratada, se cortó en pequeños trozos, se introdujo y molió en un molino ultra centrifugo (ZM 200 – RETSCH) (tabla 14a) a 10000rpm con un tamaño de partícula de 0.5mm. La harina de Cochayuyo fue almacenada en un frasco de vidrio hermético a temperatura ambiente.

2.9.2 Preparación de la mezcla a imprimir

Para la preparación de la mezcla a imprimir, se consideró una mezcla con formulación óptima obtenida de una tesis de magister previa, con un ajuste en la cantidad de agua que se utilizó como ingrediente. La mezcla consistió en 2,25 g de harina de arroz y 5,25 g de harina de Cochayuyo. A esta mezcla se le añadieron 16,5 g de agua a 100°C para alcanzar 24 g de mezcla final que corresponde a la cantidad necesaria para imprimir por triplicado el objeto en el equipo de impresión 3D (figura 11). El tiempo para la preparación de la mezcla a imprimir fueron 5 minutos. Luego, la mezcla final se introdujo en una jeringa de 60 ml para poder imprimir. La preparación de la mezcla a imprimir se realizó en el Laboratorio de Ingeniería de Procesos de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas de la Universidad de Chile.



Figura 11. Formulación óptima mezcla impresión 3D

2.9.3 Impresión 3D

Para la impresión 3D de alimentos, se utilizó el equipo Food Bot S2 (tabla 14b), el cual basa la impresión en el proceso de extrusión de material y en un sistema de posicionamiento X-Y-Z para imprimir los alimentos de manera tridimensional, disponiendo capas sobre capas (figura 12). La mezcla final se introdujo en la jeringa del equipo de impresión, la cual fue presionada a través de una especie de émbolo para ser expulsada por una boquilla circular de 0.8 mm de diámetro para obtener un diseño cúbico disponible en el software de la impresora 3D. El equipo fue programado para imprimir un diseño cúbico de 20x20x20 mm con 15% de llenado, a una temperatura de 25°C y velocidad de 55 mm/s en un tiempo de 4 minutos 45 segundos. La mezcla que iba siendo impresa por la boquilla, se fue depositando sobre un papel resistente al calor dispuesto sobre la base de la

impresora. Se imprimieron 51 muestras del producto, de las cuales 21 fueron muestra control (mezcla final en estado fresco), 18 muestras fueron sometidas a secado en horno, 9 muestras en aire forzado y 3 muestras para liofilizador. La impresión 3D del producto se llevó a cabo en el Laboratorio de Ingeniería de Procesos de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas de la Universidad de Chile.

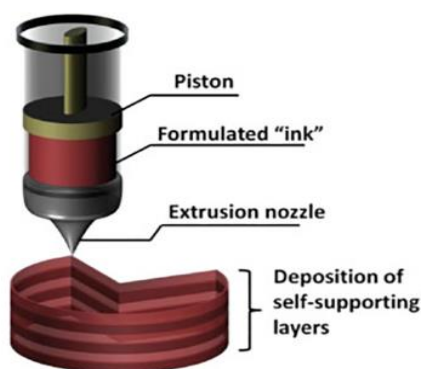


Figura 12. Impresión por extrusión impresora 3D
Fuente: Pérez et al. (2019)

2.9.4 Curvas de secado, proceso de secado y selección condición óptima de temperatura

2.9.4.1 Curvas de secado experimentales y modeladas

Se sometieron muestras por triplicado a secado por horno a 40, 60 y 80°C para lograr la deshidratación del producto hasta que éste no perdiera peso o existiera mínima variación respecto al último peso. Durante la primera hora de secado, las muestras fueron pesadas cada 5 minutos y luego cada 10 minutos. El peso de las muestras fue determinado con una balanza de precisión Radwag WTB 3000, la cual tiene una capacidad máxima de 3 Kg y una precisión de 0,01 g (tabla 14c).

Mediante las curvas de secado experimentales se definió el tiempo específico de secado necesario para deshidratar el producto impreso para cada condición de temperatura mediante horno y aire forzado. Los experimentos de secado se

llevaron a cabo en el Laboratorio de Ingeniería de Procesos de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas de la Universidad de Chile.

Con los datos obtenidos de los ensayos de secado, se realizaron las curvas de secado experimentales y modeladas. Para las curvas de secado experimentales, los resultados de humedad de las curvas experimentales se obtuvieron en base húmeda, por lo cual se modificaron en base seca. La ecuación 1 muestra la equivalencia de la humedad en base seca y húmeda (Martines et al., 2010). Luego, se determinó la razón de humedad (MR) con las humedades en base seca, lo cual permitió normalizar las curvas de secado considerando que las muestras pueden tener humedades iniciales diferentes (ecuación 2) (Cerquera et al., s.f). En el caso de la modelación de curvas, se realizó mediante el modelo matemático de Newton, en el cual se determinó la razón de humedad modelada. La ecuación 3 muestra la fórmula matemática que describe el modelo de Newton (Uribe et al., 2017) para el ajuste de las curvas de secado de alimentos. Para determinar la razón de humedad modelada, previamente se aplicó una linealización a la ecuación 3, obteniéndose la ecuación 4 linealizada.

$$\%H_{bs} = \frac{\%H_{bh}}{(100 - \%H_{bh})} * 100$$

$$MR = \frac{(H_{(t)} - H_f)}{(H_i - H_f)}$$

Donde:
 $\%H_{bs}$: Porcentaje humedad en base seca.
 $\%H_{bh}$: Porcentaje humedad en base húmeda.

Ec. 1

Donde:
 $H_{(t)}$: Contenido de humedad en un tiempo determinado.
 H_f : Contenido de humedad final.
 H_i : Contenido de humedad inicial.

Ec. 2

$$MR = \exp(-kt)$$

$$\ln MR = -kt$$

Donde:
 k : Parámetro cinético modelo de Newton.
 t : Tiempo (minutos).

Ec. 3

Donde:
 k : Parámetro cinético modelo de Newton.
 t : Tiempo (minutos).

Ec. 4

La dependencia de la temperatura sobre el parámetro cinético k del modelo de Newton, se puede representar mediante la ecuación de Arrhenius (Ec. 5) (Vega-Gálvez et al., 2008).

$$k = k_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)$$

Donde:

k : Parámetro cinético k del modelo de Newton.

Ec. 5

k_0 : Factor de Arrhenius (1/min).

E_a : Energía de activación (kJ/mol).

R : Constante universal de gases.

T : Temperatura (K).

2.9.4.2 Proceso de secado

De las 51 muestras impresas, 21 se dejaron como control (snack en estado fresco) para determinar la composición química, compuestos bioactivos y capacidad antioxidante. Para el secado en horno, se utilizaron 9 muestras para determinar los respectivos tiempos y curvas de secado experimentales para cada condición de temperatura (40, 60 y 80°C), además de la modelación de curvas. Para los análisis posteriores realizados a las muestras sometidas a secado en horno, aire forzado y liofilización, se utilizaron 9, 9 y 3 muestras, respectivamente. En el caso de los secados por horno y aire forzado, las muestras fueron sometidas a tres condiciones de temperatura (40, 60 y 80°C) con una velocidad de aire de 2,0 y 2,2 m/s, respectivamente, determinadas mediante un anemómetro digital AM-4836V el cual tiene un rango de 0,4-45,0 m/s y una precisión de $\pm 2\% + 0,1$ m/s (tabla 14d). Por otra parte, en el caso de las muestras que se sometieron a liofilización, estas se congelaron previamente a -18°C en el equipo refrigerador- congelador Mabe por 24 horas para luego ser liofilizadas por 48 horas a una única condición de temperatura (-55°C) y presión (0,021 mbar). El proceso de secado se llevó a cabo en el Laboratorio de Ingeniería de Procesos de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas de la Universidad de Chile.

2.9.4.3 Selección condición óptima de temperatura

A cada una de las muestras sometidas a las condiciones de temperatura de 40, 60 y 80°C en horno y aire forzado, se le realizó un análisis de las propiedades estructurales de forma, color superficial final y textura de la impresión 3D post procesada. La condición óptima de temperatura, se obtuvo comparando los resultados que mejor preservaron las propiedades estructurales en comparación al modelo digital, muestras control y resultados en la literatura, según corresponda.

A. Análisis de forma: Para evaluar la forma de las impresiones 3D post procesadas, se realizó la medición de características dimensionales de: altura (A), longitud de lado superior (Ls) y longitud de lado inferior (Li) (figura 13). Para las mediciones se utilizó un pie de metro digital Ubermann, cuyo rango de medición es de 0 a 150 mm con una precisión de $\pm 0,02$ mm (tabla 14e). Se determinó la longitud (mm) perdida de las diferentes características dimensionales para determinar el cambio de forma ($\% \Delta A$, $\% \Delta L_s$ y $\% \Delta L_i$) en porcentaje respecto a las dimensiones de la figura del modelo digital 3D (ec. 6, 7 y 8). Los resultados se expresaron en porcentaje de longitud perdida (%). Se realizó el análisis por triplicado en el Laboratorio de Química de los alimentos de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas de la Universidad de Chile.

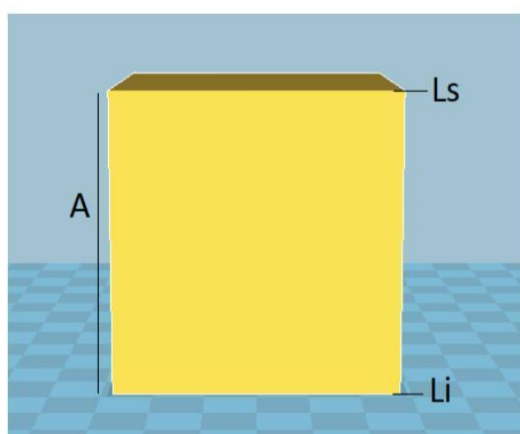


Figura 13. Características dimensionales a utilizar
Fuente: Vásquez (2023)

$$\% \Delta A = \frac{A_0 - A}{A_0} * 100$$

Ec. 6

Donde:

A_0 : Altura modelo digital (cm).

A: Altura muestra (cm).

$$\% \Delta L_s = \frac{L_{s_0} - L_s}{L_{s_0}} * 100$$

Donde:

L_{s_0} : Longitud lado superior modelo digital (cm). Ec. 7

L_s : Longitud lado superior muestra (cm).

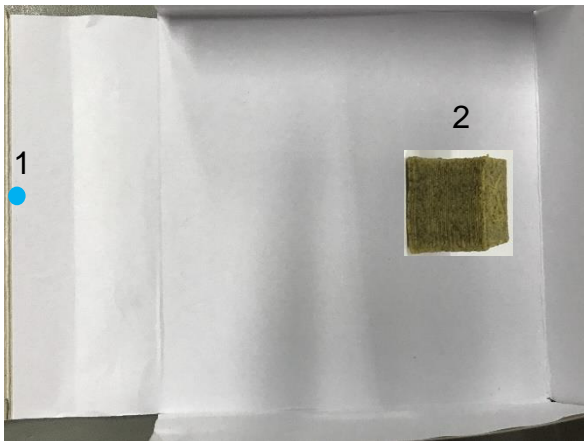
$$\% \Delta L_i = \frac{L_{i_0} - L_i}{L_{i_0}} * 100$$

Donde:

L_{i_0} : Longitud lado inferior modelo digital (cm). Ec. 8

L_i : Longitud lado inferior muestra (cm).

B. Análisis del color superficial final: Para evaluar el color de las impresiones 3D post procesadas, se tomaron fotografías de cada una de las muestras con un escenario estandarizado en las condiciones de fondo, luz y ángulo (figura 14). Luego, las fotografías fueron procesadas en el programa Adobe Photoshop CS6 para medir las coordenadas colorimétricas L^* (luminosidad, escala de 0-negro a 100-blanco), a^* (verde/rojizo, valores negativos a positivos) y b^* (azulado/amarillo, valores negativos a positivos) (CIELAB) (figura 15). Se tomaron diez mediciones por fotografía de cada uno de los parámetros indicados (figura 16). Se determinó el cambio de color superficial final (ΔE) respecto a las muestras control, el cual fue el parámetro considerado para definir las muestras que presentaron mayor o menor diferencia de color. La ecuación 9 muestra la fórmula matemática para determinar el cambio de color superficial final (Tello-Ireland et al., 2011). Este parámetro se clasificó en: a) Muy diferente ($\Delta E > 3$), b) Diferente ($1.5 < \Delta E < 3$) y c) Mínima diferencia ($\Delta E < 1.5$) (Adekunte et al., 2010). Los resultados no se expresaron en alguna unidad de medida (adimensionales). Se realizó el análisis por triplicado en el Laboratorio de Química de los alimentos de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas de la Universidad de Chile.



1. Punto ubicación cámara fotográfica.
2. Punto ubicación objeto a fotografiar.

Figura 14. Escenario con parámetros de fondo, luz y ángulo controlados

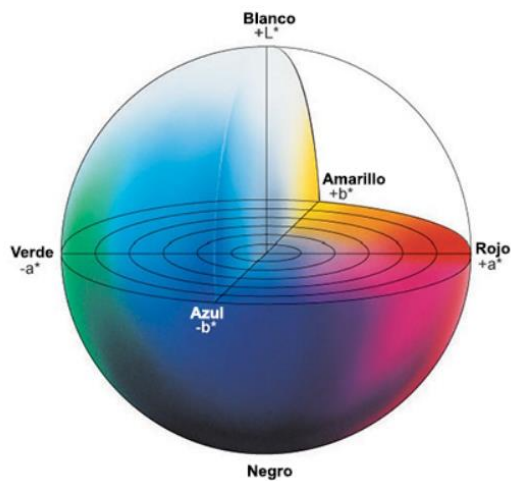
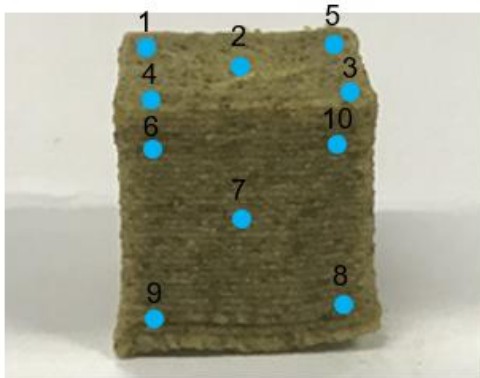


Figura 15. Espacio de color CIELab
Fuente: Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) (2023)



$$\Delta E = \sqrt{(a^* - a_0)^2 + (b^* - b_0)^2 + (L^* - L_0)^2}$$

Donde:

a_0 , b_0 , L_0 : Coordenadas colorimétricas muestras control.

a^* , b^* y L^* : Coordenadas colorimétricas otras muestras.

Ec. 9

Figura 16. Puntos de análisis del color superficial final de la estructura impresa 3D

C. Análisis de textura: Para evaluar la textura de las impresiones 3D post procesadas, estas fueron sometidas a secado 40 horas antes, almacenadas en un frasco de vidrio hermético con sílica gel y este envase cubierto con una bolsa plástica transparente con cierre hermético para ser trasladadas al lugar del análisis. Se tomaron dos mediciones por muestra. La textura se determinó con prueba de penetración con una sonda cilíndrica de aluminio de 2 mm, hundida a una profundidad de 6 mm y a una velocidad de 5 mm/s para determinar la dureza, expresada como la fuerza máxima (N) para romper la muestra. La prueba se llevó a cabo con el equipo TA.XTplusC (tabla 14f). Se utilizó el software Exponent versión 6.2.2.0. Los resultados se expresaron en Newton (N). Los resultados se compararon con la evidencia de la literatura de snacks impresos en 3D sometidos a secado que presentaron una mayor aceptabilidad. Se realizó el análisis por triplicado en el Laboratorio de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile donde se encuentra el equipo.

2.9.5 Composición química, compuestos bioactivos y capacidad antioxidante

2.9.5.1 Composición química: Se determinó la composición química del snack en estado fresco (humedad, cenizas, proteínas, carbohidratos y grasa total), para lo cual se realizó un análisis proximal. Para el análisis de humedad, cenizas y proteínas se utilizaron los métodos estándar de la AOAC 1996, contenido de humedad (934.01), cenizas (930.05) y proteínas (N*6.25, 954.01). Para la determinación de grasa total se utilizó el método Bligh & Dyer definido en la Guía de Laboratorio de Bromatología 2023 de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas de la Universidad de Chile. Los carbohidratos totales fueron estimados por diferencia de 100 con los otros componentes (humedad, cenizas, proteínas y grasas). Por otra parte, se utilizó la ecuación de equivalencia de la humedad en base seca (H_{bs}) y húmeda (H_{bh}) (Ec. 1) para determinar la composición química de las otras muestras sometidas a secado, ya que sus respectivas humedades no presentaron diferencias estadísticamente significativas entre ellas. Los resultados de humedad se expresaron en g/100 g peso fresco, mientras que el resto de los parámetros en g/ 100 g materia seca. Se realizó el análisis por triplicado en el Laboratorio de Química de los alimentos de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas de la Universidad de Chile.

2.9.5.2 Compuestos bioactivos: Se determinó el contenido de polifenoles totales de las muestras en estado fresco y post procesadas a las condiciones óptimas de cada temperatura de secado. El contenido de polifenoles totales se determinó mediante Folin- Ciocalteu, para lo cual se extrajeron los polifenoles de las muestras utilizando el extracto metanólico obtenido del procedimiento Bligh & Dyer, luego se añadió el reactivo Folin-Ciocalteu y frente al cual los compuestos fenólicos reaccionaron dando una coloración azul determinada mediante espectrofotómetro a 765 nm (Pacheco et al., 2020). Los resultados se expresaron en mg EAG/100 g materia seca. Se realizó el análisis por triplicado en el Laboratorio de Química de los alimentos de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas de la Universidad de Chile.

2.9.5.3 Capacidad antioxidante: Se determinó la actividad antioxidante de las muestras en estado fresco y post procesadas a las condiciones óptimas de cada temperatura de secado. La capacidad antioxidante se determinó mediante los métodos DPPH^{*} y ORAC. En el caso de DPPH^{*} (2,2-difenil-1-picrilhydrazil), se esperó que los antioxidantes de las muestras neutralizaran los radicales libres 2,2-difenil-1-picrilhydrazil mediante la transferencia de hidrógeno principalmente (Mercado-Mercado et al., 2013). Para el caso del ORAC (capacidad de absorción de radicales de oxígeno), se esperó que los antioxidantes de las muestras neutralizaran los radicales de peroxilo. Los resultados se expresaron en μ moles ET/100 g materia seca. Se realizó el análisis por triplicado en el Laboratorio de Química de los alimentos de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas de la Universidad de Chile.

2.9.6 Análisis estadístico

Los resultados de las mediciones experimentales por triplicado se expresaron mediante valores promedio \pm error estándar. El análisis estadístico de los datos se realizó mediante un análisis de varianza (ANOVA) a través del software STATGRAPHICS Centurion XVI.I.

Tabla 14. Equipos utilizados en la metodología

<p>a) Molino ultra centrífugo ZM 200- RETSCH. Fuente: Extraído sitio web empresa CIMATEC S.A.C (2022)</p>	<p>b) Impresora 3D de alimentos Food Bot S2. Fuente: Extraído de sitio web empresa 3D Printers Online Store (2022)</p>	<p>c) Balanza de precisión Radwag.</p>
		
<p>d) Anemómetro digital AM-4836V. Fuente: Extraído de sitio web empresa Digital Instruments (2023)</p>	<p>e) Pie de metro digital. Fuente: Extraído de sitio web empresa Ubermann (2023)</p>	<p>f) Analizador de textura TA.XTplus100C. Fuente: Stable Mycro Systems (2022)</p>
		

La figura 17, corresponde a un diagrama que resume la metodología utilizada en el estudio.

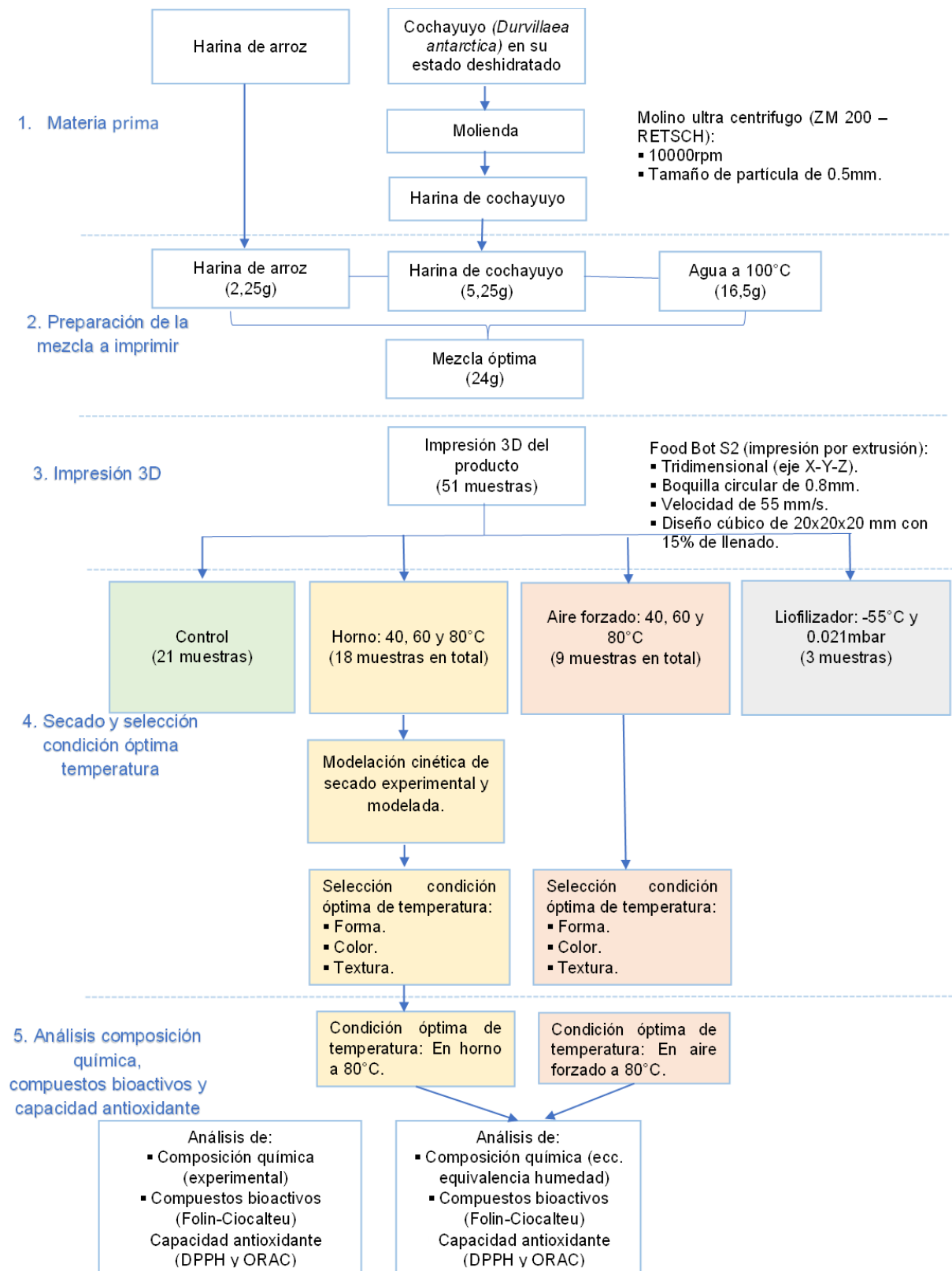


Figura 17. Resumen metodología utilizada

III. RESULTADOS

3.1 Secado

3.1.1 Curvas de secado experimentales y modeladas

El tiempo de secado para cada condición de temperatura por secado en horno y aire forzado, fue determinado mediante curvas de secado, es así como para la condición de temperatura de 40°C, el tiempo de secado fue de 320 minutos, mientras que para las condiciones de 60 y 80°C fue de 260 y 160 minutos, respectivamente (figura 18). Mientras mayor es la temperatura de secado, el tiempo para lograr la humedad de equilibrio como consecuencia de la deshidratación del producto es menor, generando una disminución exponencial de la humedad con las temperaturas utilizadas (Lemus et al., 2008; Uribe et al., 2017).

Las curvas de secado obtenidas de manera experimental (figura 18), mostraron un decrecimiento del contenido de humedad cuando aumentó la temperatura y tiempo de secado. Mientras mayor fue la temperatura, menor fue el tiempo de secado. Al comparar el comportamiento de las curvas de secado experimentales y modeladas (figura 18), se observó que ambas presentaron un perfil con una tendencia descendente de la humedad durante todo el proceso de secado. De acuerdo con la modelación de las curvas, la obtención de la humedad de equilibrio debe ser más rápida cuando las muestras se sometieron a 60 y 80°C, mientras que a los 40°C el proceso debería ser más lento, lo cual coincidió con las curvas experimentales obtenidas.

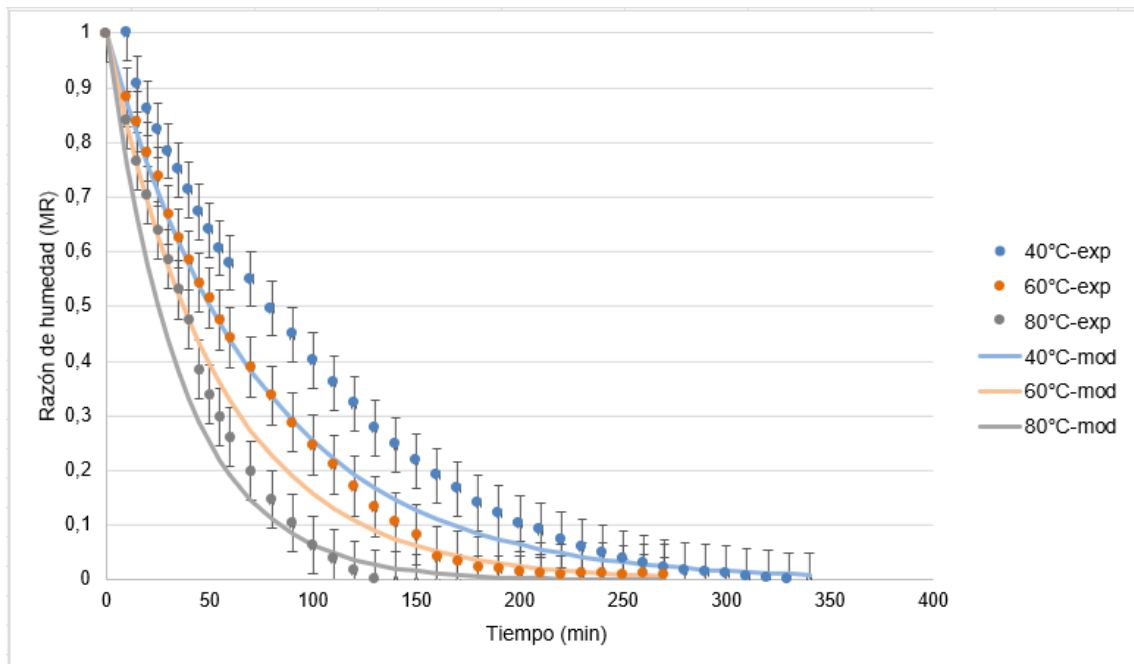


Figura 18. Razón de humedad experimental y modelada del producto impreso en 3D sometido a 40, 60 y 80°C en horno

La tabla 15 muestra los valores del parámetro cinético del modelo de Newton (k) y el coeficiente de determinación (R^2) obtenidos de la modelación de las curvas mediante el modelo indicado. El valor de R^2 permitió evaluar el ajuste de los datos, el cual lo ideal es que tienda hacia el valor 1. Los valores obtenidos para las tres temperaturas de secado, fueron superiores a 0,95 para cada parámetro cinético, lo cual indica que existe una dependencia del valor de k y la temperatura de secado, demostrando que el modelo de Newton fue una herramienta adecuada para modelar las curvas de secado (Vega et al., 2007).

Tabla 15. Constantes empíricas modelo Newton

Temperatura	k	R^2
40°C	$0,0137 \pm 0,0030$	$0,9619 \pm 0,0178$
60°C	$0,0185 \pm 0,0012$	$0,9837 \pm 0,0019$
80°C	$0,0275 \pm 0,0017$	$0,9628 \pm 0,0078$

Respecto a lo obtenido por la ecuación de Arrhenius, el valor de la energía de activación (E_a) fue 230,91 kJ/mol y el factor de Arrhenius de 6,15 1/min. La figura 19, muestra la relación del logaritmo de k y la temperatura (K), la cual determina que existe un efecto de la temperatura de secado sobre el parámetro cinético k del modelo de Newton, esto se verifica con el $R^2= 0,987$. Ante lo anterior, existe una relación directamente proporcional entre la temperatura y el parámetro cinético de k, es decir, a medida que aumenta la temperatura de secado, aumenta el valor k, por lo cual existe una dependencia.

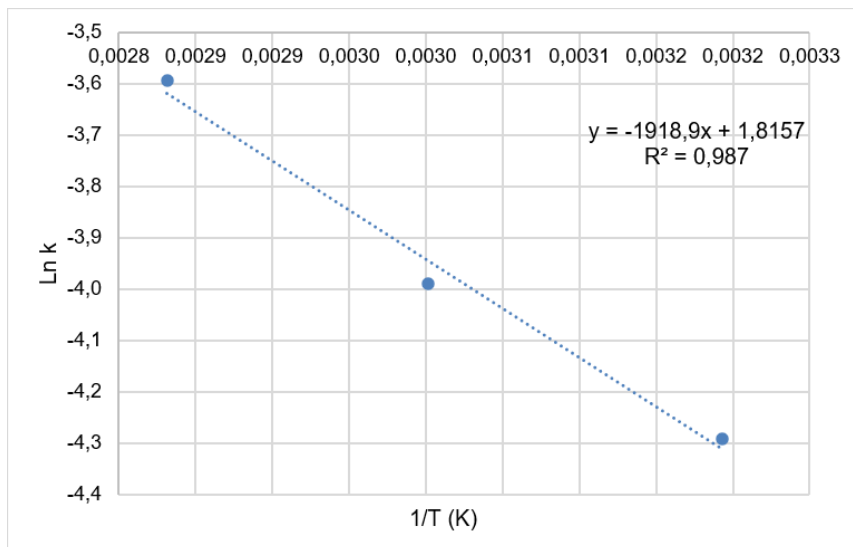


Figura 19. Relación entre logaritmo k y temperatura

En la ecuación 10 se muestra como quedó la fórmula con los valores obtenidos de k_0 y E_a .

$$k = k_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)$$

$$k = 6,15 \cdot \exp\left(-\frac{230,91}{RT}\right)$$

Ec. 10

Donde:

k : Parámetro cinético k del modelo de Newton.

k_0 : Factor de Arrhenius (1/min).

E_a : Energía de activación (kJ/mol).

R: Constante universal de gases.

T: Temperatura (K).

3.1.2 Pérdida de peso de las muestras post procesadas según método de secado

Para el método de secado en horno, las muestras secadas a 80°C presentaron una mayor pérdida de peso ($69,61 \pm 0,69\%$) en comparación a la condición de temperatura de 40°C ($p < 0,05$). En el caso de las muestras secadas a 60°C en comparación a las otras condiciones de temperatura, no presentaron una diferencia significativa en la pérdida de peso ($p > 0,05$) (tabla 16).

En el caso del aire forzado, existió una diferencia significativa en la pérdida de peso de las muestras independiente de la condición de temperatura de secado, siendo menor la pérdida de peso a 40°C ($66,81 \pm 0,19\%$) y mayor a 80°C ($69,67 \pm 0,46\%$) (tabla 16).

Al comparar los resultados de pérdida de peso por los métodos de horno y aire forzado con la liofilización, esta última presentó muestras a las cuales se les extrajo una humedad levemente mayor, lo cual se explica por los principios que rigen cada uno de los métodos, horno y aire forzado evaporación, mientras que sublimación en la liofilización.

Tabla 16. Pérdida de peso de las muestras impresas 3D según método y condición de temperatura de secado

Método de secado	Temperatura (°C)	Pérdida de peso (%)
Horno	40	$67,61 \pm 0,80^a$
	60	$68,61 \pm 0,35^{ab}$
	80	$69,61 \pm 0,69^b$
Aire forzado	40	$66,81 \pm 0,19^x$
	60	$68,01 \pm 0,34^y$
	80	$69,67 \pm 0,46^z$
Liofilizador	-55°C 0,021 mbar	$70,74 \pm 0,39$

a, b, c Para método de secado horno.
x, y, z Para método de secado aire forzado.
Las letras diferentes para el mismo método de secado significan diferencia significativa ($p < 0,05$).

Al comparar la pérdida de peso producida por los métodos de secado por horno y aire forzado no hubo una diferencia significativa ($p > 0,05$). Por el contrario, el método de liofilización fue el que presentó diferencias significativas ($p < 0,05$) en comparación a los métodos indicados previamente, permitiendo una mayor extracción de humedad de las muestras (tablas 17, 18 y 19).

Tabla 17. Pérdida de peso de las muestras impresas 3D según método de secado a condición de temperatura de 40°C

Método de secado	Temperatura (°C)	Pérdida de peso (%)
Horno	40	67,61 ± 0,80 ^A
Aire forzado	40	66,81 ± 0,19 ^A
Liofilizador	-55°C 0,021 mbar	70,74 ± 0,39 ^B

Las letras diferentes para el mismo método de secado significan diferencia significativa ($p < 0,05$).

Tabla 18. Pérdida de peso de las muestras impresas 3D según método de secado a condición de temperatura de 60°C

Método de secado	Temperatura (°C)	Pérdida de peso (%)
Horno	60	68,61 ± 0,35 ^M
Aire forzado	60	68,01 ± 0,34 ^M
Liofilizador	-55°C 0,021 mbar	70,74 ± 0,39 ^N

Las letras diferentes para el mismo método de secado significan diferencia significativa ($p < 0,05$).

Tabla 19. Pérdida de peso de las muestras impresas 3D según método de secado a condición de temperatura de 80°C

Método de secado	Temperatura (°C)	Pérdida de peso (%)
Horno	80	69,61 ± 0,69 ^P
Aire forzado	80	69,67 ± 0,46 ^P
Liofilizador	-55°C 0,021 mbar	70,74 ± 0,39 ^Q

Las letras diferentes para el mismo método de secado significan diferencia significativa ($p < 0,05$).

Como resultado del proceso de secado, se produce una pérdida de peso de las muestras, la cual fue mayor cuando se secaron las muestras a 80°C indistintamente del método utilizado (69,61±0,69% horno y 69,67±0,46% aire forzado). El método de liofilización generó un producto con una mayor deshidratación en comparación a los otros dos métodos utilizados, logrando una mayor pérdida de humedad de las muestras (74,74±0,39%). Este último método permite productos con menos del 15% de humedad (Ramírez, 2006).

3.2 Selección condición óptima de temperatura de los métodos de secado por horno y aire forzado

3.2.1 Análisis de forma

Para el análisis de los cambios de forma, se determinó la longitud (mm) perdida de las diferentes características dimensionales para determinar el cambio de forma ($\% \Delta A$, $\% \Delta L_s$ y $\% \Delta L_i$) en porcentaje respecto a las dimensiones de la figura del modelo digital 3D.

En ese sentido, respecto a la pérdida de la longitud de la altura ($\% \Delta A$) de las muestras no hubo diferencias significativas entre las estructuras sometidas a los diferentes métodos y condiciones de temperatura de secado ($p > 0,05$) (tabla 20).

Respecto a los cambios de longitud del lado superior ($\% \Delta L_s$) de las muestras, no existieron diferencias significativas cuando estas fueron sometidas a las diferentes condiciones de temperatura de secado por horno ($p > 0,05$). Sin embargo, esta longitud sí tuvo cambios significativos cuando las muestras fueron sometidas a temperaturas de secado de 60°C ($12,20 \pm 0,65\%$) mediante aire forzado, produciéndose una menor pérdida de la longitud ($p < 0,05$). Para el caso de las muestras sometidas a secado a 40°C , no existieron diferencias significativas en comparación a la condición de 80°C ($p > 0,05$) (tabla 20).

A diferencia de lo que ocurrió con la $\% \Delta L_s$, la longitud de lado inferior ($\% \Delta L_i$) de las muestras no presentaron diferencias significativas cuando estas fueron sometidas a las diferentes condiciones de temperatura por aire forzado ($p > 0,05$). Sin embargo, esta longitud sí tuvo cambios significativos cuando las muestras fueron sometidas a temperaturas de secado de 40 ($9,45 \pm 2,19\%$) y 80°C ($12,88 \pm 0,58\%$), produciéndose una menor y mayor pérdida de longitud respectivamente ($p < 0,05$). Para el caso de las muestras sometidas a secado a 60°C , no existieron diferencias significativas en comparación a las otras condiciones de temperatura ($p > 0,05$) (tabla 20).

Tabla 20. Cambios en la forma de las muestras impresas 3D según condición de temperatura de secado

Método de secado	Temperatura (°C)	A (mm)	Ls (mm)	Li (mm)	ΔA (%)	ΔLs (%)	ΔLi (%)
Horno	40	16,48 ± 0,41 ^a	16,31 ± 0,46 ^a	18,11 ± 0,44 ^a	17,58 ± 2,04 ^a	18,43 ± 2,28 ^a	9,45 ± 2,19 ^a
	60	16,89 ± 0,45 ^a	16,62 ± 0,61 ^a	17,77 ± 0,32 ^{ab}	15,53 ± 2,24 ^a	16,92 ± 3,05 ^a	11,17 ± 1,59 ^{ab}
	80	16,99 ± 0,48 ^a	16,73 ± 0,27 ^a	17,42 ± 0,12 ^b	15,05 ± 2,42 ^a	16,35 ± 1,36 ^a	12,88 ± 0,58 ^b
Aire forzado	40	17,44 ± 0,49 ^x	16,97 ± 0,33 ^x	17,80 ± 0,17 ^x	12,80 ± 2,43 ^x	15,17 ± 1,65 ^x	11,02 ± 0,85 ^x
	60	17,10 ± 0,36 ^x	17,56 ± 0,13 ^y	17,84 ± 0,44 ^x	14,52 ± 1,82 ^x	12,20 ± 0,65 ^y	10,82 ± 2,18 ^x
	80	17,64 ± 0,44 ^x	16,94 ± 0,28 ^x	17,94 ± 0,32 ^x	11,78 ± 2,18 ^x	15,28 ± 1,40 ^x	10,28 ± 1,62 ^x

a, b, c Para método de secado horno.

x, y, z Para método de secado aire forzado.

Las letras diferentes en la misma columna para el mismo método de secado significan diferencia significativa (p<0,05).

Al comparar las características dimensionales %ΔA, %ΔLs y %ΔLi de las muestras sometidas a secado en horno y aire forzado a las diferentes condiciones de temperatura (40, 60 y 80°C), no se observaron diferencias significativas entre métodos de secado (p>0,05) (tablas 21, 22 y 23).

Tabla 21. Cambios en la forma de las muestras impresas 3D según método de secado a condición de temperatura de 40°C

Método de secado	Temperatura (°C)	A (mm)	Ls (mm)	Li (mm)	ΔA (%)	ΔLs (%)	ΔLi (%)
Horno	40	16,48 ± 0,41 ^A	16,31 ± 0,46 ^A	18,11 ± 0,44 ^A	17,58 ± 2,04 ^A	18,43 ± 2,28 ^A	9,45 ± 2,19 ^A
Aire forzado	40	17,44 ± 0,49 ^A	16,97 ± 0,33 ^A	17,80 ± 0,17 ^A	12,80 ± 2,43 ^A	15,17 ± 1,65 ^A	11,02 ± 0,85 ^A

Las letras diferentes en la misma columna significan diferencia significativa (p<0,05).

Tabla 22. Cambios en la forma de las muestras impresas 3D según método de secado a condición de temperatura de 60°C

Método de secado	Temperatura (°C)	A (mm)	Ls (mm)	Li (mm)	ΔA (%)	ΔLs (%)	ΔLi (%)
Horno	60	16,89 ± 0,45 ^M	16,62 ± 0,61 ^M	17,77 ± 0,32 ^M	15,53 ± 2,24 ^M	16,92 ± 3,05 ^M	11,17 ± 1,59 ^M
Aire forzado	60	17,10 ± 0,36 ^M	17,56 ± 0,13 ^M	17,84 ± 0,44 ^M	14,52 ± 1,82 ^M	12,20 ± 0,65 ^M	10,82 ± 2,18 ^M

Las letras diferentes en la misma columna significan diferencia significativa (p<0,05).

Tabla 23. Cambios en la forma de las muestras impresas 3D según método de secado a condición de temperatura de 80°C

Método de secado	Temperatura (°C)	A (mm)	Ls (mm)	Li (mm)	ΔA (%)	ΔLs (%)	ΔLi (%)
Horno	80	16,99 ± 0,48 ^P	16,73 ± 0,27 ^P	17,42 ± 0,12 ^P	15,05 ± 2,42 ^P	16,35 ± 1,36 ^P	12,88 ± 0,58 ^P
Aire forzado	80	17,64 ± 0,44 ^P	16,94 ± 0,28 ^P	17,94 ± 0,32 ^P	11,78 ± 2,18 ^P	15,28 ± 1,40 ^P	10,28 ± 1,62 ^P

Las letras diferentes en la misma columna significan diferencia significativa (p<0,05).

Como resultado del post procesamiento de las muestras, para el método de secado por horno a las diferentes condiciones de temperatura, no hubo diferencias significativas en $\% \Delta A$ y $\% \Delta L_s$, a diferencia de lo que ocurrió con $\% \Delta L_i$ en la cual hubo diferencias significativas cuando las muestras se sometieron a 40°C , provocando una menor pérdida de la longitud ($9,45 \pm 2,19\%$) en comparación a 80°C ($12,88 \pm 0,58\%$). Para el caso del método de secado por aire forzado, no hubo diferencias significativas en $\% \Delta A$ y $\% \Delta L_i$ a las diferentes condiciones de temperatura, pero sí hubo diferencias en $\% \Delta L_s$, la cual presentó una menor pérdida cuando las muestras fueron sometidas a 60°C ($12,20 \pm 0,65\%$) en comparación a 80°C ($15,28 \pm 1,40\%$). Ante a lo expuesto, tanto para el método de secado por horno y aire forzado, la mayoría de las longitudes ($\% \Delta A$ horno y aire forzado, $\% \Delta L_s$ horno y $\% \Delta L_i$ aire forzado) no presentaron diferencias significativas entre condiciones de temperatura de secado, por lo cual se consideró que la temperatura de 80°C es la condición que permitió una menor pérdida de las longitudes de las muestras, así como también la que permitió una mayor eficiencia del proceso de secado por requerir un menor tiempo para llevar a cabo la deshidratación.

Los cambios de forma dependerán de los diferentes métodos de secado y condiciones de temperatura. Estos cambios son un factor inevitable asociado al post procesamiento de las estructuras impresas en 3D, generando separación de los filamentos impresos, formación de grietas y contracción o expansión de volumen (Chen et al., 2022).

3.2.2 Análisis del color superficial final

Para el análisis de los cambios de color de las muestras sometidas a los métodos de secado al horno y aire forzado, se realizó mediante la medición de las coordenadas colorimétricas (L^* , a^* y b^*) y el cambio de color superficial final (ΔE), este último fue el parámetro considerado para determinar si las muestras presentaron una mayor o menor diferencia de color superficial final en comparación al color superficial de las muestras control en estado fresco.

Las coordenadas colorimétricas para las muestras control (fresco) fueron $38,87 \pm 3,16$, $-1,00 \pm 0,26$ y $25,63 \pm 1,62$ para L^* , a^* y b^* , respectivamente. La tabla 24 muestra que la luminosidad (L^*) fue mayor en las muestras control en comparación a las muestras secadas en horno y aire forzado a las diferentes condiciones de temperatura ($p < 0,05$). De las muestras sometidas a secado en horno, a la condición de temperatura de 60°C las muestras presentaron una mayor luminosidad ($28,07 \pm 1,02$) en comparación a la condición de temperatura de 40°C ($p < 0,05$), mientras que con las muestras sometidas a 80°C no presentaron diferencias significativas ($p > 0,05$). Para el caso del método de aire forzado, esta coordenada fue mayor en las muestras sometidas a 40°C ($29,53 \pm 0,93$) en comparación a las muestras sometidas a 80°C ($p < 0,05$).

En relación con la coordenada a^* (verde/rojizo), las muestras secadas en horno a 60°C ($-0,77 \pm 0,12$) no tuvieron una diferencia significativa en comparación a las muestras control ($p > 0,05$), mientras que aquellas sometidas a aire forzado a las diferentes condiciones de temperatura presentaron modificaciones significativas de esta coordenada ($p < 0,05$) (tabla 24).

Para la coordenada b^* (azulado/amarillo), las muestras sometidas a las diferentes condiciones de temperatura para cada método de secado presentaron diferencias significativas en comparación a las muestras control ($p < 0,05$), pasando desde un color amarillo a uno tendiente al azulado (tabla 24).

Respecto a ΔE (cambio de color superficial final) de las muestras impresas sometidas a diferentes condiciones de temperatura, tuvieron una menor variación al ser sometidas a 80°C en horno y aire forzado ($p < 0,05$), considerando que para este último método no hubo una diferencia significativa en comparación al cambio de color de las muestras a 40°C ($p > 0,05$) (tabla 24). Por otra parte, indistintamente del método y condición de secado, las muestras presentaron una clasificación del color superficial final de muy diferente ($\Delta E > 3$).

Tabla 24. Coordenadas colorimétricas y cambios en el color superficial final de las muestras impresas 3D según temperatura de secado

Método de secado	Temperatura	L*	a*	b*	ΔE
Control (fresco)	-	38,87 \pm 3,16 ^{ax}	-1,00 \pm 0,26 ^{ax}	25,63 \pm 1,62 ^{ax}	-
Horno	40°C	22,83 \pm 1,01 ^b	-0,10 \pm 0,30 ^b	12,90 \pm 1,13 ^b	20,49 \pm 0,49 ^a
	60°C	28,07 \pm 1,02 ^c	-0,77 \pm 0,12 ^a	10,50 \pm 0,79 ^c	18,59 \pm 1,11 ^a
	80°C	27,83 \pm 2,63 ^c	0,07 \pm 0,06 ^b	17,53 \pm 0,95 ^d	13,73 \pm 3,15 ^b
Aire forzado	40°C	29,53 \pm 0,93 ^y	-0,10 \pm 0,26 ^y	17,40 \pm 1,54 ^y	12,48 \pm 0,47 ^x
	60°C	26,67 \pm 1,15 ^{yz}	-0,27 \pm 0,15 ^y	13,13 \pm 0,65 ^z	17,48 \pm 1,09 ^y
	80°C	25,00 \pm 2,95 ^z	0,10 \pm 0,26 ^y	17,37 \pm 1,25 ^y	16,18 \pm 3,24 ^{xy}

a, b, c, d Para método de secado horno.
x, y, z Para método de secado aire forzado.
Las letras diferentes en la misma columna para el mismo método de secado significan diferencia significativa ($p < 0,05$).

Al comparar ΔE (cambio de color superficial final) de las muestras sometidas a secado en horno y aire forzado a la condición de 40°C, se observó que las muestras sometidas al método de secado por aire forzado presentaron una menor variación del color (12,48 \pm 2,23) en comparación al secado por horno, aun cuando este cambio se clasifica como muy diferente ($\Delta E > 3$) (tabla 25). En relación las muestras secadas a las otras condiciones de temperatura (60 y 80°C), no hubo diferencias significativas entre métodos de secado ($p > 0,05$) (tablas 26 y 27).

Tabla 25. Coordenadas colorimétricas y cambios en el color superficial final de las muestras impresas 3D según método de secado a condición de temperatura de 40°C

Método de secado	Temperatura	L*	a*	b*	ΔE
Horno	40°C	22,83 ± 1,01 ^A	-0,10 ± 0,30 ^A	12,90 ± 1,13 ^A	20,49 ± 0,49 ^A
Aire forzado	40°C	29,53 ± 0,93 ^B	-0,10 ± 0,26 ^A	17,40 ± 1,54 ^B	12,48 ± 0,47 ^B

Las letras diferentes en la misma columna significan diferencia significativa (p<0,05).

Tabla 26. Coordenadas colorimétricas y cambios en el color superficial final de las muestras impresas 3D según método de secado a condición de temperatura de 60°C

Método de secado	Temperatura	L*	a*	b*	ΔE
Horno	60°C	28,07 ± 1,02 ^M	-0,77 ± 0,12 ^M	10,50 ± 0,79 ^M	18,59 ± 1,11 ^M
Aire forzado	60°C	26,67 ± 1,15 ^M	-0,27 ± 0,15 ^N	13,13 ± 0,65 ^N	17,48 ± 1,09 ^M

Las letras diferentes en la misma columna significan diferencia significativa (p<0,05).

Tabla 27. Coordenadas colorimétricas y cambios en el color superficial final de las muestras impresas 3D según método de secado a condición de temperatura de 80°C

Método de secado	Temperatura	L*	a*	b*	ΔE
Horno	80°C	27,83 ± 2,63 ^P	0,07 ± 0,06 ^P	17,53 ± 0,95 ^P	13,73 ± 3,15 ^P
Aire forzado	80°C	25,00 ± 2,95 ^P	0,10 ± 0,26 ^P	17,37 ± 1,25 ^P	16,18 ± 3,24 ^P

Las letras diferentes en la misma columna significan diferencia significativa (p<0,05).

Como resultado del post procesamiento de las muestras, la propiedad estructural de color más adecuada de las muestras es aquella que presenta una menor variación del color en comparación a las muestras control (fresco). Es así, como para el método de secado por horno a la condición de temperatura de 80°C es cuando se produjo una menor variación del color superficial final. Para el caso del método de secado por aire forzado, la menor variación del color superficial final ocurrió a los 40°C, sin embargo, esta condición de temperatura no presentó diferencias significativas en el cambio de color superficial final de las muestras sometidas a la condición de 80°C. Ante lo expuesto, tanto para el método de secado por horno y aire forzado, la condición de temperatura de secado de 80°C fue la que presentó una menor variación del color superficial final.

El color es un componente de la calidad en la industria alimentaria, ya que es parte del atractivo de los alimentos y por ende es un ítem importante en las preferencias del consumidor. Los cambios de color en los alimentos es un fenómeno complejo que no posee modelos confiables que predigan estos cambios (Engin, 2020). Las muestras fueron impresas utilizando una misma formulación de mezcla de harina de Cochayuyo (*Durvillaea antarctica*), harina de arroz y agua, por lo cual el cambio de color superficial final fue provocado por el método de secado a determinadas condiciones de temperatura, los cuales influyen sobre el cambio de color final. En general, existe una asociación en que períodos largos y altas temperaturas de secado producen degradación de los pigmentos de color mediante la oxidación por descomposición térmica de estos, generando variación en el color (Engin, 2020). La coloración de la especie *Durvillaea antarctica* está dada por la presencia de carotenoides (xantofilas fucoxantina y flavoxantina) y clorofilas (a y c) (Ortiz, 2011), predominando la clorofila a (Uribe et al., 2018). En ese sentido, cuando los pigmentos de clorofila son sometidos a calor, existe una conversión de clorofila a feofitinas, lo que provoca un cambio de verde brillante a marrón oliva. Específicamente, este cambio de coloración se debe a la degradación de la clorofila, la cual a través de procesos químicos pierde grupos magnesio, fitol y carbometoxi, transformándose en pirofeofitina (Ahmed et al., 2000). El alga *Durvillaea antarctica* en estado fresco presenta $698,6 \pm 5,3$ mg/Kg materia seca de clorofila a, sin embargo, cuando es sometida a temperaturas de secado de 40, 60 y 80°C presenta un deterioro significativo de este pigmento, $438,0 \pm 2,0$, $412,0 \pm 20,3$ y $483,9 \pm 5,7$ respectivamente (Uribe et al., 2018).

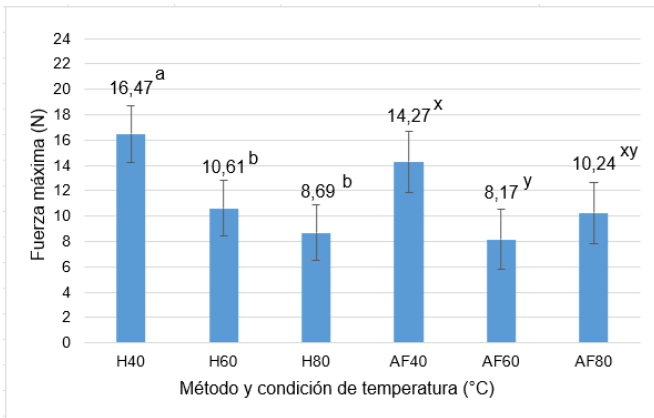
3.2.3 Análisis de la textura

Para el análisis de textura de las muestras sometidas a los métodos de secado por horno y aire forzado, se realizó una prueba de penetración para determinar la fuerza máxima (N) requerida para romper una muestra, la cual se asocia a la dureza del producto.

En el caso de las muestras sometidas al método de secado en horno, la mayor dureza se obtuvo cuando estas fueron sometidas a 40°C (16,47±5,28N) ($p < 0,05$). En el caso de las muestras sometidas a 80°C, presentaron una menor dureza (8,69±1,91N) en comparación a aquellas secadas a 40°C ($p < 0,05$), pero no hubo diferencias significativas al compararlas con las muestras sometidas a 60°C ($p > 0,05$) (figura 20).

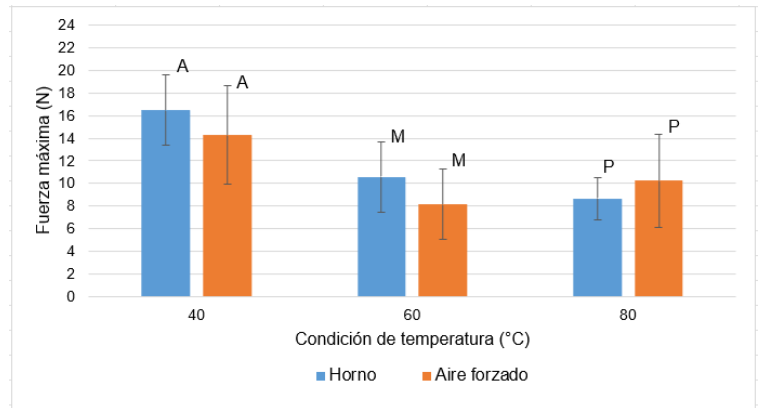
Para el caso de las muestras post procesadas por aire forzado, las muestras sometidas a 40°C presentaron mayor dureza (14,27±4,36N) en comparación a aquellas sometidas a 60°C (8,17±3,09N) ($p < 0,05$), mientras que no presentó diferencias significativas al comparar la dureza con aquellas muestras sometidas a 80°C (10,24±4,10N) ($p > 0,05$). En el caso de las muestras sometidas a 60°C, presentaron una menor dureza, sin embargo, no presentó diferencias significativas con aquellas muestras a 80°C ($p > 0,05$) (figura 20).

Cabe señalar, que las muestras presentaron diferencias en cuanto a su textura cuando fueron sometidas a condiciones de temperatura y tiempos de secado diferentes, sin embargo, no hubo diferencias significativas al comparar las muestras de una misma condición de temperatura, pero con métodos de secado distintos (figura 21).



a, b, c Para método de secado horno.
 x, y, z Para método de secado aire forzado.
 Las letras diferentes para el mismo método de secado significan diferencia significativa ($p < 0,05$).

Figura 20. Fuerza máxima según método y condición de temperatura



Las letras diferentes para la misma condición de temperatura significan diferencia significativa ($p < 0,05$).

Figura 21. Comparación de la fuerza máxima a una misma condición de temperatura según método de secado

Como resultado del post procesamiento de las muestras, para el método de secado por horno, la condición de temperatura de 80°C es la que permitió obtener muestras con una menor dureza o fuerza máxima para su rompimiento. Para el caso del aire forzado, si bien a los 60°C se obtuvieron las muestras con una menor dureza, esta no tuvo diferencias significativas al compararlas con la condición de temperatura de 80°C, por lo tanto, se seleccionó esta condición para la eficiencia del proceso de secado. Las muestras con una menor dureza son aceptadas de mejor forma por consumidores.

Los componentes de forma y color son parte de la calidad de los alimentos. Es así, como la textura también es un componente relevante, siendo una de las propiedades de mayor importancia para la aceptabilidad de los alimentos. La percepción de la textura es un sistema complejo que involucra varios sentidos, tales como la visión, audición, tacto y kinestésica (Derossi et al., 2021). Los cambios de textura responden a diversos factores, sin embargo, el estudio utilizó una misma formulación de mezcla de harina de Cochayuyo (*Durvillaea antarctica*), harina de arroz y agua, por lo cual el cambio en la textura fue provocado por el método de secado a determinadas condiciones de temperatura.

En general, existe información respecto a que los snacks enriquecidos con microalgas, independiente de su tipo, presentan una mayor dureza (Uribe-Wandurruga et al., 2020; Letras et al., 2022). Mayor dureza en alimentos está asociado a la pérdida de agua durante el post procesamiento (secado), lo cual implica que se presente un menor contenido de humedad y actividad de agua (Uribe-Wandurruga et al., 2020; Oliveira et al., 2022). Por lo tanto, aquellas muestras sometidas a un menor tiempo de secado presentan una textura más suave en comparación a aquellas expuestas a un tiempo mayor de secado (Letras et al., 2022). Se han realizado análisis sensorial de productos impresos en 3D y sometidos a post procesamiento, dentro de lo cual se analizó la aceptabilidad de las diferentes texturas del alimento. Letras et al. (2022), evaluó mediante una escala hedónica de 1 a 7 diferentes snacks que tenían 5% de dos microalgas diferentes (Espirulina y Chlorella) y obtuvieron como resultado que aquellos snacks que más gustaron presentaron una dureza de 12,4 N (Espirulina), seguidos por aquellos con 34,8 N (Chlorella) y 32,6 N (snack control). Oliveira et al. (2022), evaluó mediante un perfil sensorial snacks con un 2 y 6% de una microalga (Chlorella) y obtuvieron que el snack mejor evaluado presentó una dureza de 7,4 N (2% microalga), seguido por 9,24 N (6% microalga).

La figura 22 muestra de manera visual, las modificaciones de forma y color superficial final de las muestras sometidas a diferentes métodos de secado y condiciones de temperatura.

Método de secado	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Modelo digital impresora 3D A= 20 mm Ls= 20 mm Li= 20 mm Color superficie= N/A Textura= N/A	<p>Textura (Fuerza máxima: N) Porcentaje de longitud lado superior perdido (%ΔLs) Cambio de color superficie (ΔE) Porcentaje de longitud lado inferior perdido (%ΔLi)</p>	<p>Textura (Fuerza máxima: N) Porcentaje de longitud lado superior perdido (%ΔLs) Cambio de color superficie (ΔE) Porcentaje de longitud lado inferior perdido (%ΔLi)</p>	<p>Textura (Fuerza máxima: N) Porcentaje de longitud lado superior perdido (%ΔLs) Cambio de color superficie (ΔE) Porcentaje de longitud lado inferior perdido (%ΔLi)</p>
Control (fresco) %ΔA= N/A %ΔLs= N/A %ΔLi= N/A Color superficie= L* 38,87 ± 3,16 a* -1,00 ± 0,26 b* 25,63 ± 1,62 Fuerza máxima= N/A			
Horno 40°C %ΔA= 17,58 ± 2,04 %ΔLs= 18,43 ± 2,28 %ΔLi= 9,45 ± 2,19 ΔE= 20,49 ± 0,49 Fuerza máxima= 16,47 ± 5,28 N			
Horno 60°C %ΔA= 15,53 ± 2,24 %ΔLs= 16,92 ± 3,05 %ΔLi= 11,17 ± 1,59 ΔE= 18,59 ± 1,11 Fuerza máxima= 10,61 ± 2,67 N			
Horno 80°C %ΔA= 15,05 ± 2,42 %ΔLs= 16,35 ± 1,36 %ΔLi= 12,88 ± 0,58 ΔE= 13,73 ± 3,15 Fuerza máxima= 8,69 ± 1,91 N			
Aire forzado 40°C %ΔA= 12,80 ± 2,43 %ΔLs= 15,17 ± 1,65 %ΔLi= 11,02 ± 0,85 ΔE= 12,48 ± 0,47 Fuerza máxima= 14,27 ± 4,36 N			
Aire forzado 60°C %ΔA= 14,52 ± 1,82 %ΔLs= 12,20 ± 0,65 %ΔLi= 10,82 ± 2,18 ΔE= 17,48 ± 1,09 Fuerza máxima= 8,17 ± 3,09 N			
Aire forzado 80°C %ΔA= 11,78 ± 2,18 %ΔLs= 15,28 ± 1,40 %ΔLi= 10,28 ± 1,62 ΔE= 16,18 ± 3,24 Fuerza máxima= 10,24 ± 4,10 N			
Liofilizador -55°C y 0,021 mbar %ΔA= 1,23 ± 0,34 %ΔLs= 3,98 ± 1,05 %ΔLi= 4,83 ± 1,98 ΔE= 21,84 ± 3,74 Fuerza máxima= 5,43 ± 1,48 N			

Figura 22. Imágenes de la estructura impresa 3D según método de secado y condición de temperatura

La tabla 28 muestra un resumen de las propiedades estructurales según la condición de temperatura de 80°C que mejor preservó la forma, color superficial final y textura de las muestras.

Tabla 28. Propiedades estructurales a la condición óptima de temperatura de los métodos de secado

Método de secado	Temperatura	Forma			Color	Textura
		% ΔA	% ΔL_s	% ΔL_i	ΔE	Fuerza máxima (N)
Horno	80°C	15,05 \pm 2,42	16,35 \pm 1,36	12,88 \pm 0,58	13,73 \pm 3,15	8,69 \pm 1,91
Aire forzado	80°C	11,78 \pm 2,18	15,28 \pm 1,40	10,28 \pm 1,62	16,18 \pm 3,24	10,24 \pm 4,10

3.3 Análisis composición química, compuestos bioactivos y capacidad antioxidante

3.3.1 Análisis composición química

Para el análisis de la composición química de las muestras en estado fresco, se realizó un análisis proximal para determinar humedad, cenizas, proteínas, carbohidratos y grasa total. En el caso de las muestras sometidas a los métodos de secado al horno, aire forzado y liofilizadas, se utilizó la ecuación de equivalencia de la humedad en base seca (H_{bs}) y húmeda (H_{bh}).

Las muestras control que corresponden a la mezcla en estado fresco, fueron las que mostraron una mayor humedad ($69,53 \pm 0,52$ g/100g peso fresco) en comparación con las otras muestras analizadas ($p < 0,05$). Respecto a los otros componentes analizados, no hubo diferencias significativas entre las muestras analizadas ($p > 0,05$) (tabla 29).

Tabla 29. Composición química de las muestras según método y condición de secado

Parámetro (g/ 100 g materia seca)	Control (fresco)	Horno 80°C	Aire forzado 80°C	Liofilizador -55°C 0,021 mbar
Humedad ^c	$69,53 \pm 0,52^a$	$0,91 \pm 0,05^b$	$0,76 \pm 0,43^b$	$0,78 \pm 0,32^b$
Cenizas	$15,30 \pm 0,84^a$	$15,16 \pm 0,83^a$	$15,18 \pm 0,83^a$	$15,18 \pm 0,83^a$
Proteínas ^d	$8,31 \pm 0,37^a$	$8,24 \pm 0,37^a$	$8,25 \pm 0,37^a$	$8,25 \pm 0,37^a$
Grasas	$3,97 \pm 1,61^a$	$3,93 \pm 1,60^a$	$3,94 \pm 1,60^a$	$3,94 \pm 1,60^a$
Carbohidratos ^e	$72,41 \pm 0,89^a$	$71,75 \pm 0,88^a$	$71,86 \pm 0,88^a$	$71,85 \pm 0,88^a$

a, b Las letras diferentes en la misma fila significan diferencia significativa ($p < 0,05$).

c Humedad considerada en base húmeda, expresada como g/100 g peso fresco. El resto de los resultados expresados en g/100 g materia seca.

d Las proteínas fueron estimadas considerando el factor de conversión de 6,25.

e Los carbohidratos totales fueron estimados por diferencia de 100 con los otros componentes (humedad, cenizas, proteínas y grasas).

Al tratarse de una formulación basada principalmente harina de Cochayuyo (*Durvillaea antarctica*), harina de arroz y agua en diferentes proporciones adaptadas desde Vásquez (2023), no existe evidencia de un análisis de composición química previamente. Ante esto, se compararon los resultados obtenidos con aquellos disponibles de la literatura respecto a la composición nutricional de Cochayuyo fresco y otras algas pardas, sometido a secado a 80°C y liofilizado.

Al comparar los resultados de la composición química de las muestras control (formulación en estado fresco) con *Durvillaea antarctica* fresca, se observó que esta última presentó una mayor humedad ($77,39 \pm 1,43$ g/100 g peso fresco), cenizas ($17,57 \pm 2,65$ g/100 g materia seca) y carbohidratos ($79,93 \pm 2,82$ g/100 g materia seca). Mientras que una menor cantidad de proteínas ($1,71 \pm 0,19$ g/100 g materia seca) y grasas ($0,80 \pm 0,06$ g/100 g materia seca) (tablas 29 y 30). Por otra parte, al comparar los resultados obtenidos con la composición química de otras algas pardas como *Laminaria digitata* (Kombu), *Laminaria japónica* (Kombu), *Himanthalia elongata* (Espagueti de mar) y *Undaria pinnatifida* (Wakame) (Quitral et al., 2019), las especies *Laminaria japónica* y *Undaria pinnatifida* presentaron un mayor aporte de proteínas en comparación a las muestras control (25,7 y 11,93 g/100 g base seca, respectivamente), mientras que *Laminaria digitata* e *Himanthalia elongata* un menor aporte (5,79 y 4,84 g/100 g base seca, respectivamente). Para el caso de los lípidos, todas las especies presentaron un menor aporte en comparación a las muestras control (*Laminaria digitata* 0,57 g/100 g base seca, *Laminaria japónica* 0,79 g/100 g base seca, *Himanthalia elongata* 1,32 g/100 g base seca y *Undaria pinnatifida* 0,88 g/100 g base seca). De manera adicional, otra alga parda es la *Macrocystis pyrifera* (Huiro) (Ortiz, 2011), la cual presentó un mayor aporte de proteínas y carbohidratos al compararlas con las muestras control ($13,2 \pm 0,0$ y $75,3 \pm 0,2$ % base seca, respectivamente), mientras que un menor aporte de lípidos y cenizas ($0,7 \pm 0,1$ y $10,8 \pm 0,3$ % base seca, respectivamente).

Al comparar las muestras sometidas a secado por horno y aire forzado a una condición de temperatura de 80° C con lo que expone la literatura respecto al alga *Durvillaea antarctica* sometida a la misma temperatura de secado. Los resultados mostraron que el alga pura, presentó una mayor humedad (6,38±0,08 g/100 g peso fresco) y cenizas (23,32±0,57 g/100 g materia seca), pero menor cantidad de proteínas (7,57±0,13 g/100 g materia seca), grasas (1,04±0,05 g/100 g materia seca) y carbohidratos (68,08±0,63 g/100 g materia seca). Para el caso de la comparación con el alga sometida a liofilización, esta presenta valores mayores en los parámetros de humedad (8,15±0,014 g/100 g peso fresco), cenizas (26,06±0,031 g/100 g materia seca) y proteínas (10,79±0,08 g/100 g materia seca), a diferencia de los valores de grasas (0,43±0,022 g/100 g materia seca) y carbohidratos (54,57 g/100 g materia seca), los cuales fueron menores (tablas 29 y 30).

Tabla 30. Composición química de *Durvillaea antarctica* en estado fresco, sometida a secado a 80°C y liofilizada

Parámetro (g/100 g materia seca)	Fresco (Uribe et al., 2017)	80°C (Uribe et al., 2017)	Liofilizado (Caballero et al., 2021)
Humedad	77,39 ± 1,43 ^b	6,38 ± 0,08 ^b	8,15 ± 0,014 ^c
Cenizas	17,57 ± 2,65	23,32 ± 0,57	26,06 ± 0,031 ^c
Proteínas	1,71 ± 0,19	7,57 ± 0,13	10,79 ± 0,08 ^c
Grasas	0,80 ± 0,06	1,04 ± 0,05	0,43 ± 0,022 ^c
Carbohidratos ^a	79,93 ± 2,82	68,08 ± 0,63	54,57

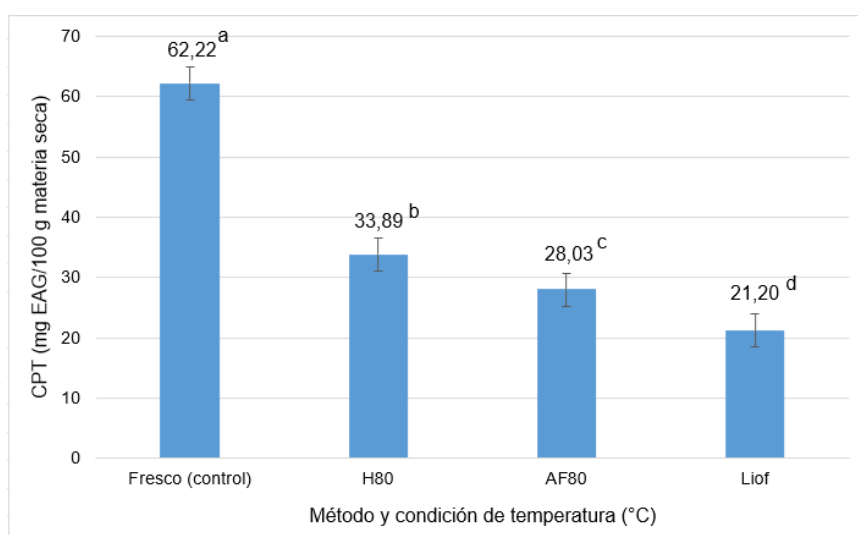
^a Calculado por diferencia.
^b Expresado como g/100 g peso fresco.
^c Expresado como g/100 g macroalga.

En general, Uribe et al. (2017) estableció que existen diferencias significativas entre el estado fresco del alga en comparación a cuando secada a 80°C. En dicho estudio, se observó que la humedad y carbohidratos fueron menores, mientras que los parámetros de cenizas, proteínas y grasas fueron mayores en el alga seca ($p < 0,05$) (tabla 8).

3.3.2 Compuestos bioactivos

Para el análisis del contenido de polifenoles totales de las muestras en estado fresco y sometidas a los métodos de secado al horno, aire forzado y liofilizadas, se determinó mediante el método de Folin- Ciocalteu.

En el caso de las muestras control que corresponden a la mezcla en estado fresco, fueron las que presentaron una mayor concentración de polifenoles totales ($62,22 \pm 6,61$ mg EAG/100g materia seca) en comparación a las otras muestras analizadas ($p < 0,05$). Respecto a la concentración de polifenoles en las otras muestras, hubo diferencias significativas, ya que los métodos y condiciones de secado que presentaron una menor pérdida de estos compuestos bioactivos fueron muestras sometidas a secado por horno a 80°C (33,89%), aire forzado 80°C (28,03%) y liofilizadas a $-55^\circ\text{C}/0,021$ mbar (21,20%) ($p < 0,05$) (figura 23).



Las letras diferentes significan diferencia significativa ($p < 0,05$).

Figura 23. Contenido de polifenoles totales según método y condición de temperatura

Al comparar los resultados del contenido total de polifenoles de las muestras control (formulación en estado fresco) con *Durvillaea antarctica* fresca, se observó que esta última presentó mayores concentraciones descritas por otros autores, $198,57$ mg EAG/ 100 g alga seca (Ortiz et al., 2011) y 660 ± 34 mg EAG/ 100 g materia seca (Uribe et al., 2018). Por otra parte, al comparar los resultados obtenidos con la composición química de otra alga parda como la *Macrocystis pyrifera* (Huiro) (Ortiz, 2011), esta alga también presentó una mayor

concentración de polifenoles totales (96,46 mg EAG/ 100 g alga seca) en comparación a las muestras control.

Al comparar las muestras sometidas a secado por horno y aire forzado a una condición de temperatura de 80° C con lo que expone la literatura respecto al alga *Durvillaea antarctica* sometida a la misma temperatura de secado. Los resultados mostraron que el alga pura, presentó una menor pérdida de polifenoles cuando el alga se sometió a un secado a 40 y 50°C (23 y 22% respectivamente), mientras que la mayor pérdida ocurrió a una temperatura de 60°C (47%), la cual no presentó diferencias significativas con el secado a 80°C (41%) (Uribe et al., 2018).

Respecto a antecedentes sobre el contenido de polifenoles en algas liofilizadas, se utilizaron los antecedentes de Uribe et al. (2019), quienes reportaron un contenido de polifenoles totales para *Durvillaea antarctica* liofilizada de 315,2±28,39 mg EAG/100 g materia seca, siendo un valor mayor al resultado obtenido de las muestras analizadas (21,20±2,51 mg EAG/100 g materia seca). De manera adicional, se buscó información respecto a algunas frutas referentes en el contenido de polifenoles, es así como el açai colombiano, maqui y orujo de kiwi liofilizados presentaron un mayor contenido de polifenoles 3172,3±56,3 mg EAG/ 100 g de liofilizado (Rojano et al., 2011), 49,74±0,57 mg EAG/g peso seco (Genskowsky, 2015) y 25,52±1,27 mg EAG/100 g materia seca (Zhang et al., 2024). Sin embargo, cabe señalar que en el mismo estudio de Uribe et al. (2019), el contenido de polifenoles de la *Durvillaea antarctica* liofilizada (315,2±28,39 mg EAG/100 g materia seca) no presentó diferencias significativas con el contenido del alga sometida a secado por convección (336,0±30,71 mg EAG/100 g materia seca). De manera adicional, un trabajo de tesis en el cual se estudió el contenido de polifenoles totales de maqui concluyó que la pérdida de los polifenoles para el fruto liofilizado (35%) y secado por convección (34%), no presentó diferencias significativas (Guerrero, 2016).

El contenido de polifenoles totales disminuye debido a que, durante el proceso de secado, hay actividad de enzimas oxidativas, polifenoloxidasas y peroxidasas, las cuales influyen en la pérdida de moléculas fenólicas. De manera adicional, también es posible que la disminución de estos compuestos por su unión con proteínas, lo cual modifica las estructuras químicas (Bhat et al., 2022). En el caso de *Durvillaea antarctica* sometida a secado a 60 y 80°C, si bien no hubo diferencias significativas en la pérdida total de polifenoles, cabe señalar que la pérdida fue levemente menor a esta última temperatura, lo cual se asoció a un tiempo de secado más corto (Uribe et al., 2018; Bhat et al., 2022).

Por otra parte, los resultados respecto a la liofilización son diferentes a lo registrado por estudios previos, ya que la baja temperatura de este método permitiría una mejor preservación de los polifenoles e inhibición de la actividad de la enzima polifenoloxidasas (Zhang et al., 2024). Sin embargo, es relevante destacar que el proceso previo a la liofilización propiamente tal pudo haber afectado el contenido total de polifenoles, ya antes de la liofilización, las muestras fueron sometidas a 24 horas de congelación lenta a -18°C en un congelador de un equipo comercial común dañando la matriz (Ribas- Agustí et al., 2018), mientras que otros estudios refieren haber realizado una congelación previa rápida a la liofilización a -80°C (Zhang et al., 2024). Una congelación lenta, se asociaría a la formación de cristales de hielo de mayor tamaño que dañaron el tejido y por ende alterara la cantidad de estos compuestos, ya que, si bien esto permitiría una mayor extracción de los compuestos, también quedarían expuestos a una oxidación y degradación mayor (Ribas-Agustí et al. 2018).

De manera adicional, el bajo contenido de polifenoles totales de las muestras en comparación a muestras de *Durvillaea antarctica* fresca y sometida a secado por convección y liofilizada, puede tener relación con el método de extracción y el tipo de polifenoles presentes en este tipo de alga parda. En el presente estudio, se utilizó el método de extracción sólido-líquido por maceración con metanol. Dentro de las ventajas del proceso de maceración se encuentran su simplicidad, configuración menos experimental, bajo costo y a sus características respetuosas con el medio ambiente (Sridhar et al., 2021). El rendimiento y composición del extracto dependen del tipo de solvente, la relación sólido-

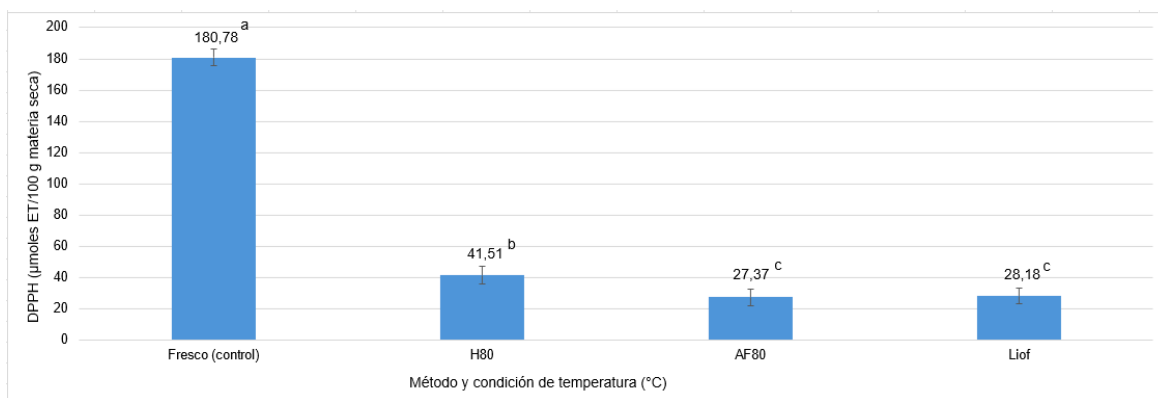
líquido, tiempo de extracción y temperatura (Erpel et al., 2020). Para el proceso de extracción de estos compuestos, los métodos convencionales utilizan solventes como metanol, etanol, acetona, éter dietílico y acetato de etilo, los cuales se mezclan con agua en diferentes proporciones. Se ha observado que, dentro de los solventes orgánicos, el metanol es más eficiente en la extracción de polifenoles con bajo peso molecular, a diferencia de la acetona acuosa que sería más adecuada para la extracción de los flavonoles de mayor peso molecular (Brglez et al., 2016). Sin embargo, dentro de los polifenoles destacados de las algas pardas se encuentran los florotaninos, los cuales representan alrededor del 30% del peso seco del alga y debido a su variedad de estructuras químicas presentan pesos moleculares diversos (Erpel et al., 2020), por lo cual el metanol sería más adecuado solo sobre aquellos de bajo peso molecular.

Debido a que el uso de este tipo de solventes orgánicos en los métodos convencionales pueden generar daño en la salud humana al presentarse en los productos finales (Brglez et al., 2016) y tener un bajo rendimiento (Lee et al., 2024), se han ido explorando tecnologías no convencionales de extracción, tales como extracción de líquido caliente a presión (HPLE), extracción centrífuga de particiones (ECP), extracción asistida por microondas (EAM), extracción asistida por ultrasonidos (EAU) y extracción asistida por enzimas (EAE) (Erpel et al., 2020). Ante esto, los estudios actuales se centran en comparar la extracción con un método convencional y no convencional. Pacheco et al. (2020), comparó el contenido de polifenoles totales de extractos de algas pardas y rojas obtenidos mediante el uso de acetona (método convencional) y de etanol/agua en HPLE (método no convencional), de lo cual se obtuvo que, en la mayoría de los casos los extractos con acetona presentaron valores mayores en el contenido de polifenoles totales (10-20%) que los extractos con etanol en HPLE. Por otra parte, Lee et al. (2024), comparó el contenido de polifenoles totales de extractos de algas pardas obtenidos mediante etanol (método convencional) y etanol en EAU (método no convencional), de lo cual se obtuvo que este último método presentó ventajas sobre el método convencional por el alto contenido de polifenoles.

3.3.3 Capacidad antioxidante

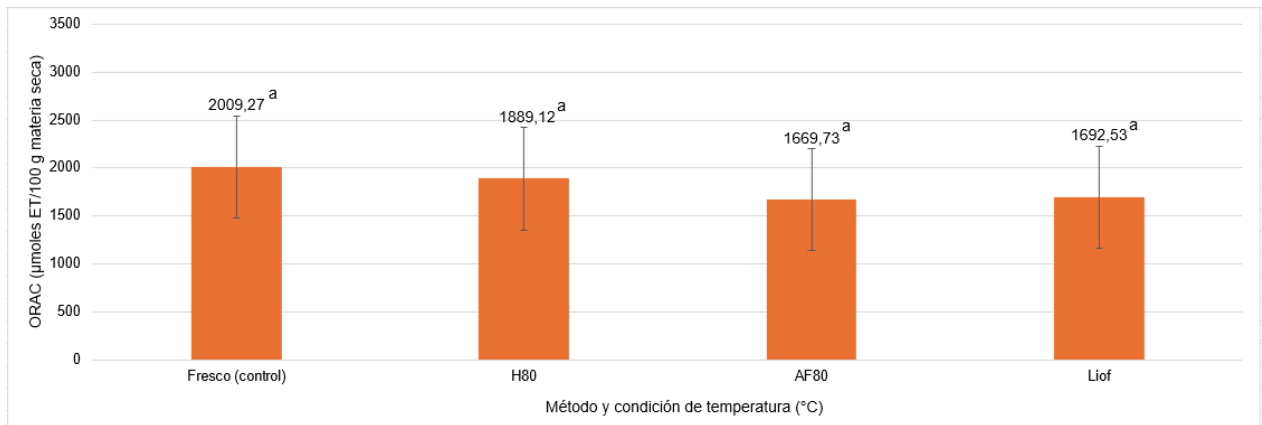
En el caso de la capacidad antioxidante de las muestras en estado fresco y sometidas a los métodos de secado al horno, aire forzado y liofilizadas, se determinó mediante los métodos DPPH y ORAC.

En el caso del análisis de DPPH, las muestras control que corresponden a la mezcla en estado fresco, fueron las que presentaron una mayor capacidad antioxidante ($180,78 \pm 11,07$ μ moles ET/100g materia seca) en comparación a las otras muestras analizadas ($p < 0,05$). Respecto a las muestras sometidas a secado, por horno a 80°C , fue el que presentó una mayor capacidad antioxidante ($41,51 \pm 7,07$ μ moles ET/100g materia seca) ($p < 0,05$) en comparación al aire forzado y liofilizado. Las muestras sometidas a secado por estos últimos métodos, no presentaron diferencias significativas en la capacidad antioxidante ($p > 0,05$) (figura 24). Por el contrario, del análisis llevado a cabo por ORAC, no hubo diferencias significativas de las muestras sometidas a secado por horno, aire forzado y liofilizado en comparación a las muestras control ($2009,27 \pm 2,30$ μ moles ET/100g materia seca) ($p > 0,05$) (figura 25).



Las letras diferentes significan diferencia significativa ($p < 0,05$).

Figura 24. Capacidad antioxidante por DPPH según método y condición de temperatura



Las letras diferentes significan diferencia significativa ($p < 0,05$).

Figura 25. Capacidad antioxidante por ORAC según método y condición de temperatura

Al comparar los resultados de la capacidad antioxidante de las muestras control (formulación en estado fresco) con *Durvillaea antarctica* fresca, se observó que esta última presentó una mayor capacidad antioxidante según DPPH (2257 ± 20 µmoles ET/100 g materia seca) y ORAC (8278 ± 140 µmoles ET/100 g materia seca) descritas Uribe et al. (2018).

Por otra parte, se compararon las muestras sometidas a secado por horno y aire forzado a una condición de temperatura de 80°C con lo que expone la literatura respecto al alga *Durvillaea antarctica*. Según lo expuesto, el alga presentó una reducción significativa de su capacidad antioxidante cuando fue sometida a secado sobre los 70°C (figura 4), lo cual coincide con los resultados obtenidos a partir de DPPH (figura 24), pero no por ORAC (figura 25).

Respecto a antecedentes sobre la capacidad antioxidante en algas liofilizadas, al igual que para el contenido de polifenoles, se utilizaron los antecedentes de Uribe et al. (2019) para *Durvillaea antarctica* liofilizada, quienes determinaron la capacidad antioxidante mediante DPPH y ORAC. Sus resultados establecieron valores de $352,4 \pm 27,8$ µmoles ET/100 g materia seca para DPPH y $3194 \pm 34,1$ µmoles ET/100 g materia seca para ORAC, ambos mayores a los resultados obtenidos de las muestras analizadas ($28,18 \pm 6,18$ y $1692 \pm 4,13$ µmoles ET/100 g materia seca para DPPH y ORAC, respectivamente). De manera adicional, se buscó información respecto a algunas frutas destacadas por su capacidad antioxidante, es así como el açai colombiano liofilizado presentó una mayor

capacidad antioxidante 12420 ± 465 μ moles ET/100 g liofilizado (DPPH) y $101336,1$ μ moles ET/100 g liofilizado (ORAC) (Rojano et al., 2011). Por otra parte, el maqui liofilizado también presentó una mayor capacidad antioxidante respecto a las muestras del estudio sometidas a liofilización ($2,81 \pm 0,04$ mg ET/g peso seco DPPH) (Genskowsky, 2015). Sin embargo, cabe señalar que en el mismo estudio de Uribe et al. (2019), se determinó la capacidad antioxidante de la *Durvillaea antarctica* liofilizada mediante DPPH y ORAC. Los resultados reportaron que al comparar la capacidad antioxidante de esta con el alga sometida a secado por convección, se obtuvo que presentó mayor capacidad antioxidante mediante ORAC ($3194 \pm 34,1$ μ moles ET/100 g materia seca), pero menor con DPPH ($352,4 \pm 27,8$ μ moles ET/100 g materia seca). De manera adicional, un trabajo de tesis en el cual se estudió la capacidad antioxidante por DPPH del maqui, concluyó que el fruto liofilizado (24%) y secado por convección (19%), no presentó diferencias significativas (Guerrero, 2016).

El contenido de polifenoles totales podría tener relación con la capacidad antioxidante de las muestras (Uribe et al., 2018), ya que mientras mayor es el contenido de estos compuestos en los alimentos, implicaría una mayor cantidad de compuestos liberados y absorbidos (Ribas-Agustí et al., 2018). Ante esto, el contenido de polifenoles totales es mayor en las muestras control (formulación en estado fresco), por ende, la capacidad antioxidante también es mayor para estas muestras en comparación a las sometidas a horno, aire forzado y liofilizado, ya que el procesamiento induce la degradación de los compuestos (Ribas-Agustí et al., 2018).

Sin embargo, cabe señalar que no solo es relevante la cantidad de polifenoles totales, sino su bioaccesibilidad y biodisponibilidad, lo cual influirá en los beneficios sobre la salud humana (capacidad antioxidante). La bioaccesibilidad corresponde a la fracción de compuestos que se liberan desde la matriz alimentaria y quedan disponibles para ser absorbidos por el tracto gastrointestinal. En el caso de la biodisponibilidad, corresponde a la fracción de compuestos que efectivamente se absorbe y que llegará a los tejidos o procesos metabólicos, causando los beneficios sobre la salud. Es así, como en ambos procesos influyen muchos factores, dentro de los cuales está la estructura

química de los compuestos y sus interacciones con la matriz alimentaria (Ribas-Agustí et al., 2018). En ese sentido, macromoléculas como lípidos, proteínas y carbohidratos frecuentemente están en el entorno que rodea los compuestos fenólicos, interactuando con estos mediante interacciones hidrofóbicas no covalentes principalmente. Esta interacción genera posibles enlaces químicos, atrapando estos compuestos fenólicos en la estructura de las macromoléculas afectando su bioaccesibilidad, biodisponibilidad y bioactividad (Jakobek, 2015). Las macromoléculas de mayor presencia en *Durvillaea antarctica* son los carbohidratos (Uribe et al., 2017), dentro de los cuales se encuentra el Alginato. Un alga parda comercial contiene alrededor del 20% de su peso seco en Alginato (Garbocci, 2022). Este corresponde a un polisacárido lineal poliiónico e hidrofílico, que presenta propiedades de hidrocoloide, gelificantes, estabilizantes y espesantes, por lo cual es de gran interés en la industria alimentaria (Lupo et al., 2012). Considerando la interacción de macromoléculas con compuestos fenólicos y la propiedad gelificante del alginato, es posible que ocurran interacciones entre este polisacárido y compuestos fenólicos.

El procesamiento de alimentos mediante secado y liofilización, promueven modificaciones sobre las estructuras celulares de la matriz alimentaria, sus interacciones y la estabilidad de los compuestos fenólicos (Ribas-Agustí et al., 2018).

IV. CONCLUSIÓN

La búsqueda de un snack en base a harina de Cochayuyo y arroz mediante la impresión 3D, es una propuesta atractiva. Sin embargo, es necesario el post procesamiento a través del secado para prolongar la vida útil del producto debido a su alta perecibilidad en estado fresco. La calidad del producto, ya sea propiedades estructurales de forma, color superficial final y textura, así como compuestos fenólicos, se ven modificados antes los diferentes métodos y condiciones de temperaturas de secado.

Las propiedades estructurales (forma, color superficial final y textura) se preservaron mayormente a la condición de temperatura de 80°C para los métodos de secado en horno y aire forzado.

Respecto al contenido de polifenoles totales, las muestras control y las sometidas a secado por horno a 80°C, fueron las que presentaron una mayor concentración de estos compuestos. Para el caso de la capacidad antioxidante, el análisis DPPH determinó que las muestras control y las sometidas a secado por horno a 80°C fue mayor. El análisis mediante ORAC, no presentó diferencias significativas en la capacidad antioxidante entre las muestras analizadas.

El secado por liofilización no logró preservar en mayor medida el contenido de polifenoles totales y capacidad antioxidante del snack, en comparación al secado por horno y aire forzado a 80°C.

El presente estudio es un aporte en la fase inicial para el desarrollo de un producto alimenticio tipo snack saludable orientado a distintos grupos objetivos de la población, principalmente a niños/as, el cual permitirá realzar el uso de un producto nacional, así como propiciar su consumo modificándolo mediante la impresión 3D de alimentos.

V. BIBLIOGRAFÍA

ŚCIESZKA S. y KLEWICKA, E. 2019. Algae in food: a general review. [en línea] *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* Vol. 59, N° 21 <<https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1496319>> [consulta: 05 noviembre 2022]

QUITRAL, V., MORALES, C., SEPÚLVEDA, M. y SCHWARTZ, M. 2012. Propiedades nutritivas y saludables de algas marinas y su potencialidad como ingrediente funcional. [en línea] *Revista Chilena de Nutrición* Vol. 39, N° 4 <<http://dx.doi.org/10.4067/S0717-75182012000400014>> [consulta: 05 noviembre 2022]

QUITRAL, V., JOFRÉ, M., ROJAS, N., ROMERO, N. y VALDÉS, I. 2019. Algas marinas como ingrediente funcional en productos cárnicos. [en línea] *Revista Chilena de Nutrición* Vol. 46, N° 2 <<http://dx.doi.org/10.4067/s0717-75182019000200181>> [consulta: 05 noviembre 2022]

URIBE-WANDURRAGA, Z., ZHANG, L., NOORT, M., SCHUTYSER, M., GARCÍA-SEGOVIA, P. y MARTÍNEZ-MONZÓ, J. 2020. Printability and Physicochemical Properties of Microalgae-Enriched 3D-Printed Snacks. [en línea] *Food Bioprocess Technol* Vol. 13 <<https://doi.org/10.1007/s11947-020-02544-4>> [consulta: 31 marzo 2024]

DEROSSI, A., CAPORIZZI, R., PAOLILLO, M. y SEVERINI, C. 2021. Programmable texture properties of cereal-based snack mediated by 3D printing technology. [en línea] *Journal of Food Engineering* Vol. 289 <<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110160>> [consulta: 31 marzo 2024]

LETRAS, P., OLIVEIRA, S., VARELA, J., NUNEZ, M. y RAYMUNDO, A. 2022. 3D printed gluten-free cereal snack with incorporation of *Spirulina* (*Arthrospira platensis*) and/or *Chlorella vulgaris*. [en línea] *Algal Research* Vol. 68 <<https://doi.org/10.1016/j.algal.2022.102863>> [consulta: 31 marzo 2024]

OLIVEIRA, S., SOUSA, I., NUNEZ, M. y RAYMUNDO, A. 2022. Printability evaluation of *Chlorella vulgaris* snacks. [en línea] *Algal Research* Vol. 68 <<https://doi.org/10.1016/j.algal.2022.102879>> [consulta: 31 marzo 2024]

PRAKASH, S., BHANDARI, B., GODOI, F. y ZHANG, M. 2019. Chapter 13- Future outlook of 3D food printing [en línea] Elsevier Inc. <<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814564-7.00013-4>> [consulta: 7 noviembre 2022]

BAIANO, A. 2020. 3D Printed Foods: A comprehensive review on technologies, nutritional value, safety, consumer attitude, regulatory framework, and economic and sustainability Issues. [en línea] *Food Reviews International* Vol. 38, issue 5 <<https://doi.org/10.1080/87559129.2020.1762091>> [consulta: 9 noviembre 2022]

CHEN, X., ZHANG, M., TENG, X. y MUJUMDAR, A. 2022. Recent progress in modeling 3D/4D printing of foods. [en línea] Food Engineering Reviews Vol. 14 <<https://doi.org/10.1007/s12393-021-09297-6>> [consulta: 10 noviembre 2022]

TRAN, J. 2019. Chapter 12- Safety and labelling of 3D printed food [en línea] Elsevier Inc. <<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814564-7.00012-2>> [consulta: 10 noviembre 2022]

ENFIELD, R., PANDYA, J., LU, J., MCCLEMENTS, M. y KINCHLA, A. 2022. The future of 3D Food printing: Opportunities for space applications. [en línea] Critical Reviews in Food Science and Nutrition <<https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2077299>> [consulta: 16 noviembre 2022]

TOMAŠEVIĆ, I., PUTNIK, P., VALJAK, F., PAVLIĆ, B., ŠOJIĆ, B., BEBEK, A. y BURSAČ, D. 2021. 3D printing as novel tool for fruit-based functional food production. [en línea] Current Opinion in Food Science Vol. 41 <<https://doi.org/10.1016/j.cofs.2021.03.015>> [consulta: 16 noviembre 2022]

ALMEIDA-BODERO, I., SOTOMINGA-ESPINOZA, G. y CISNEROS-PÉREZ, N. 2021. Aplicación de la manufactura aditiva en el procesamiento de alimentos. [en línea] Polo del Conocimiento Vol. 6, N° 9 <[10.23857/pc.v6i9.3083](https://doi.org/10.23857/pc.v6i9.3083)> [consulta: 20 noviembre 2022]

ORTIZ, J., ROMERO, N., ROBERT, P., ARAYA, J., LÓPEZ-HERNÁNDEZ, J., BOZZO, C., NAVARRETE, E., OSORIO, A y RÍOS, A. 2006. Dietary fiber, amino acid, fatty acid and tocopherol contents of the edible seaweeds *Ulva lactuca* and *Durvillaea antarctica*. [en línea] Food Chemistry Vol. 99 <[10.1016/j.foodchem.2005.07.027](https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.07.027)> [consulta: 05 noviembre 2022]

SERNAPESCA Anuarios estadísticos de pesca y acuicultura [en línea] <[2021_0302_desembarque_total_por_region.xlsx](https://www.sernapesca.gub.cl/2021_0302_desembarque_total_por_region.xlsx) (live.com) > [consulta: 25 noviembre 2022]

ORTIZ VIEDMA, J. (2011). Composición nutricional y funcional de algas pardas chilenas: *Macrocystis pyrifira* y *Durvillaea antarctica*. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/121459>

MACAYA, E [en línea] < (PDF) Guía Fotográfica de las Algas Marinas de Chile: Chile Continental, Juan Fernández y Rapa Nui. (researchgate.net)> [consulta: 25 noviembre 2022]

URIBE, E., VEGA-GÁLVEZ, A., VARGAS, N., PASTEN, A., RODRÍGUEZ, K. y SHUN AH-HEN, K. 2018. Phytochemical components and amino acid profile of brown seaweed *Durvillaea antarctica* as affected by air drying temperature. [en línea] Journal of Food Science and Technology Vol. 55 <<https://doi.org/10.1007/s13197-018-3412-7>> [consulta: 25 noviembre 2022]

URIBE, E., VEGA-GÁLVEZ, A., VÁSQUEZ, V., LEMUS-MONDACA, R., CALLEJAS, L. y PASTEN, A. 2017. Hot-air drying characteristics and energetic requirement of the edible brown seaweed *Durvillaea antarctica*. [en línea] *J Food Process Preserv* Vol. 41, N° 6 <<https://doi.org/10.1111/jfpp.13313>> [consulta: 25 abril 2023]

PESO-ECHARRI, P., FRONTELA-SASETA, C., GONZÁLEZ-BERMÚDEZ, C., ROS-BERRUEZO, G. y MARTÍNEZ-GRACIÁ, C. 2012. Polisacáridos de algas como ingredientes funcionales en acuicultura marina: alginato, carragenato y ulvano. [en línea] *Revista de Biología Marina y Oceanografía* Vol. 47, N° 3 <<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-19572012000300001>> [consulta: 26 abril 2023]

BOZZO, C. y RÍOS, A. 2005. Caracterización de los componentes de alto valor biológico y nutricional, presente en algas comestibles chilenas, potenciales para el desarrollo de alimentos funcionales. Memoria para optar al Título de Ingeniero en Industria Alimentaria. Santiago, Universidad Tecnológica Metropolitana, Facultad de Ciencias Naturales, Matemáticas y del Medio Ambiente, y Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas. 38p.

MATELUNA, C., FIGUEROA, V., ORTIZ, J. y AGUILERA, JM. 2020. Effect of processing on texture and microstructure of the seaweed *Durvillaea antarctica*. [en línea] *Journal of Applied Phycology* Vol. 32 <<https://doi.org/10.1007/s10811-020-02259-1>> [consulta: 08 noviembre 2024]

CABALLERO, E., FLORES, A. y OLIVARES, A. 2021. Sustainable exploitation of macroalgae species from Chilean coast: Characterization and food applications. [en línea] *Algal Research* Vol. 57 <<https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102349>> [consulta: 29 mayo 2024]

VÉLIZ, K., TOLEDO, P., ARAYA, M., GÓMEZ, MF., VILLALOBOS, V. y TALA, F. 2023. Chemical composition and heavy metal content of Chilean seaweeds: Potential applications of seaweed meal as food and feed ingredients. [en línea] *Food Chemistry* Vol. 398 <<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133866>> [consulta: 08 noviembre 2024]

ALMEIDA-ALVARADO, S., AGUILAR-LÓPEZ, T. y HERVERT-HERNÁNDEZ, D. 2014. La fibra y sus beneficios a su salud. [en línea] *An Venez Nutr* Vol. 27, N° 1 <<http://ve.scielo.org/pdf/avn/v27n1/art11.pdf>> [consulta: 26 abril 2023]

ANGIOLILLO, L., DEL NOBILE, M. y CONTE, A. 2015. The extraction of bioactive compounds from food residues using microwaves. [en línea] *Current Opinion in Food Science* Vol. 5 <<https://doi.org/10.1016/j.cofs.2015.10.001>> [consulta: 27 abril 2023]

CASSANI, L., GÓMEZ-ZAVAGLIA, A., JIMÉNEZ-LÓPEZ, C., Lourenço-Lopes, C. PRIETO, M. y Simal-Gandara, J. 2020. Seaweed-based natural ingredients: Stability of phlorotannins during extraction, storage, passage through the gastrointestinal tract and potential incorporation into functional foods. [en línea] Food Research International Vol. 137 <<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109676>> [consulta: 27 abril 2023]

ERPEL, F., MATEOS, R., PÉREZ-JIMÉNEZ, J. y PÉREZ-CORREA, J. 2020. Phlorotannins: From isolation and structural characterization, to the evaluation of their antidiabetic and anticancer potential. [en línea] Food Research International Vol. 137 <<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109589>> [consulta: 27 abril 2023]

PACHECO, L., PARADA, J., PÉREZ-CORREA, J., MARIOTTI-CELIS, M., ERPEL, F., ZAMBRANO, A. y PALACIOS, M. 2020. Bioactive Polyphenols from Southern Chile Seaweed as Inhibitors of Enzymes for Starch Digestion. [en línea] Mar. Drugs Vol. 18, N° 353 <[10.3390/md18070353](https://doi.org/10.3390/md18070353)> [consulta: 27 abril 2023]

ERPEL, F., CAMILO, C., MATEOS, R., y PÉREZ-CORREA, J. 2023. A macroporous resin purification process to obtain food-grade phlorotannin-rich extracts with α -glucosidase inhibitory activity from Chilean brown seaweeds: An UHPLC-MSn profiling. [en línea] Food Chemistry Vol. 402 <<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134472>> [consulta: 27 abril 2023]

MERCADO-MERCADO, G., CARRILLO, L., WALL-MEDRANO, A., LÓPEZ, J. y ÁLVAREZ-PARRILLA, E. 2013. Compuestos polifenólicos y capacidad antioxidante de especias típicas consumidas en México. [en línea] Nutr Hosp. Vol. 28, N° 1 <<https://dx.doi.org/10.3305/nh.2013.28.1.6298>> [consulta: 29 abril 2023]

AVELLO, M., y SUWALSKY, M. 2006. Radicales libres, antioxidantes naturales y mecanismos de protección. [en línea] Atenea (Concepc.) N° 494 <<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-04622006000200010>> [consulta: 30 abril 2023]

BENÍTEZ-ESTRADA, A., VILLANUEVA-SÁNCHEZ, J., GONZÁLEZ-ROSENDO, G., ALCÁNTAR-RODRÍGUEZ, V., PUGA-DÍAZ, R. y QUINTERO-GUTIÉRREZ, A. 2020. Determinación de la capacidad antioxidante total de alimentos y plasma humano por fotoquimioluminiscencia: Correlación con ensayos fluorométricos (ORAC) y espectrofotométricos (FRAP). [en línea] Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas Vol. 23 <<https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2020.0.244>> [consulta: 29 abril 2023]

INTRODUCCIÓN AL SECADO DE ALIMENTOS POR AIRE CALIENTE. 2020. Por Maupoey et al. Valencia, Editorial Universitat Politècnica de Valencia. 210p.

LIU, Z., HE, C., GUO, C., CHEN, F., BHANDARI, B. y ZHANG, M. 2021. Dehydration-triggered shape transformation of 4D printed edible gel structure affected by material property and heating mechanism. [en línea] Food Hydrocolloids Vol. 115 <<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106608>> [consulta: 25 abril 2023]

RAMÍREZ, J. 2006. Liofilización de Alimentos. Revista ReCiTeIA 6(2): 1-36.

LEMUS, R., PÉREZ, M., ANDRÉS, A., ROCO, T., TELLO, C. y VEGA, A. 2008. Kinetic study of dehydration and desorption isotherms of red alga Gracilaria. [en línea] LWT- Food Science and Technology Vol. 41, N° 9 <<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2007.10.011>> [consulta: 28 abril 2023]

VEGA, A., TELLO, C. y LEMUS, R. 2007. Simulación matemática del proceso de secado de la Gracilaria chilena (*Gracilaria chilensis*). [en línea] Ingeniare. Revista chilena de ingeniería Vol. 15, N° 1 <<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052007000100008>> [consulta: 13 enero 2024]

PÉREZ, B., NYKVISTA, H., BRØGGERA, A., BARMAN, M. Y FIILSØE, M. 2019. Impact of macronutrients printability and 3D-printer parameters on 3D-food printing: A review. [en línea] Food Chemistry Vol. 287 <<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.02.090>> [consulta: 28 abril 2023]

Martines, E. y Lira, L. 2010. Análisis y aplicación de las expresiones del contenido de humedad en sólidos. En: SIMPOSIO METROLOGÍA la metrología, productividad y el desarrollo económico: 27, 28 y 29 de octubre de 2010. Santiago de Querétaro, Centro Nacional de Metrología. pp. s.p.

Cerquera, N. y Castro, J. s.f. Análisis y aplicación de las expresiones del contenido de humedad en sólidos. En: Universidad Surcolombiana. Colombia.

VEGA-GÁLVEZ, A., AYALA-APONTE, A., NOTTE, E., DE LA FUENTE, L. y LEMUS-MONDACA, R. 2008. Mathematical Modeling of Mass Transfer during Convective Dehydration of Brown Algae *Macrocystis Pyrifera*. [en línea] Drying Technology Vol. 26 <[10.1080/07373930802467532](https://doi.org/10.1080/07373930802467532)> [consulta: 31 octubre 2024]

VÁSQUEZ, A. 2023. Viabilidad termofísica y capacidad de impresión de un alimento impreso 3D a base de harina de alga Cochayuyo (*Durvillaea antártica*). Memoria para optar al Título de Ingeniero en Alimentos y Tesis para optar al grado de Magister en Ciencia de los Alimentos. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas. 69p.

TRELLO-IRELAND, C., LEMUS-MONDACA, R., VEGA-GÁLVEZ, A., LÓPEZ, J. y DI SCALA, K. 2011. Influence of hot-air temperature on drying kinetics, functional properties, colour, phycobiliproteins, antioxidant capacity, texture and agar yield of alga *Gracilaria chilensis*. [en línea] Food Science and Technology Vol. 44, N° 11 < <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2011.06.008>> [consulta: 08 julio 2023]

ADEKUNTE, A., TIWARIB, B., CULLENC, P., SCANNELLD, A. y O'DONNELL, C. 2010. Effect of sonication on colour, ascorbic acid and yeast inactivation in tomato juice. [en línea] Food Chemistry Vol. 122, N° 3 <<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.01.026>> [consulta: 15 marzo 2024]

ENGIN, D. 2020. Effect of drying temperature on color and desorption characteristics of oyster mushroom. [en línea] Food Sci. Technol Vol. 40, N° 1 < <https://doi.org/10.1590/fst.37118>> [consulta: 15 marzo 2024]

AHMED, J., SHIVHARE, U. y RAGHAVAN, G. 2000. Rheological characteristics and kinetics of colour degradation of green chilli puree. [en línea] Journal of Food Engineering Vol. 44, N° 4 <[https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)00034-0](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00034-0)> [consulta: 15 marzo 2024]

URIBE, E., PARDO-ORELLANA, C., VEGA-GÁLVEZ, AH-HEN, K., PASTÉN, A., GARCÍA, V., y AUBOURG, S. 2019. Effect of drying methods on bioactive compounds, nutritional, antioxidant, and antidiabetic potential of brown alga *Durvillaea antarctica*. [en línea] Drying Technology Vol. 38, N°14 <<https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1679830>> [consulta: 29 agosto 2024]

ROJANO, B., ZAPATA, I., ALZATE, A., MOSQUERA, A., CORTÉS, F. y GAMBOA, L. 2011. Polifenoles y Actividad Antioxidante del Fruto Liofilizado de Palma Naidi (Açai colombiano) (*Euterpe oleracea* Mart). [en línea] Rev. Fac. Nac. Agron. Medellín Vol. 64, N°2 [consulta: 01 junio 2024]

GENSKOWSKY, E. 2015. Caracterización de liofilizado de maqui (*Aristotelia chilensis* (Molina) Stuntz) y su incorporación a una matriz alimentaria tipo película comestible. Memoria para optar al Título de Ingeniero en Alimentos. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas. 38p.

GUERRERO, M. 2016. Bioaccesibilidad de Antocianinas, Polifenoles Totales y Capacidad Antioxidante en Maqui (*Aristotelia chilensis* [Mol] Stuntz), Secado por Convección y Liofilización. Memoria para optar al Título de Ingeniero en Alimentos. Valdivia, Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias. 21 y 25p.

BHAT, T., HUSSAIN, S., WANI, S., RATHER, M., RESHI, M., NASSER, B., QADRI, T. y KHALIL, A. 2022. The impact of different drying methods on antioxidant activity, polyphenols, vitamin C and rehydration characteristics of Kiwifruit. [en línea] Food Bioscience Vol. 48 <<https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.101821>> [consulta: 01 junio 2024]

ZHANG, M., WU, C., ZHANG, H., YANG, N., WANG, C., JIKE, X., ZHANG, T. y LEI, H. 2024. Comparison of different drying technologies for kiwifruit pomace: Changes in physical characteristics, nutritional properties and antioxidant capacities. [en línea] Food Chemistry Vol. 451 <<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.139497>> [consulta: 01 junio 2024]

RIBAS-AGUSTÍ, A., MARTÍN-BELLOSO, O., SOLIVA-FORTUNY, R. y ELEZ-MARTÍNEZ, P. 2018. Food processing strategies to enhance phenolic compounds bioaccessibility and bioavailability in plant-based foods. [en línea] Critical Reviews in Food Science and Nutrition Vol. 58 <<https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1331200>> [consulta: 19 julio 2024]

SRIDHAR, A., PONNUCHAMY, M., SENTHIL, P., KAPOOR, A., VO, DAI-VIET. y PRABHAKAR, S. 2021. Techniques and modeling of polyphenol extraction from food: a review. [en línea] Environmental Chemistry Letters Vol. 19 <<https://doi.org/10.1007/s10311-021-01217-8>> [consulta: 20 octubre 2024]

BRGLEZ MOJZER, E., KNEZ HRNČIČ, M., ŠKERGET, M., KNEZ, Ž. Y BREN, U. 2016. Review: Polyphenols: Extraction Methods, Antioxidative Action, Bioavailability and Anticarcinogenic Effects. [en línea] Molecules Vol. 21 <<https://doi.org/10.3390/molecules21070901>> [consulta: 20 octubre 2024]

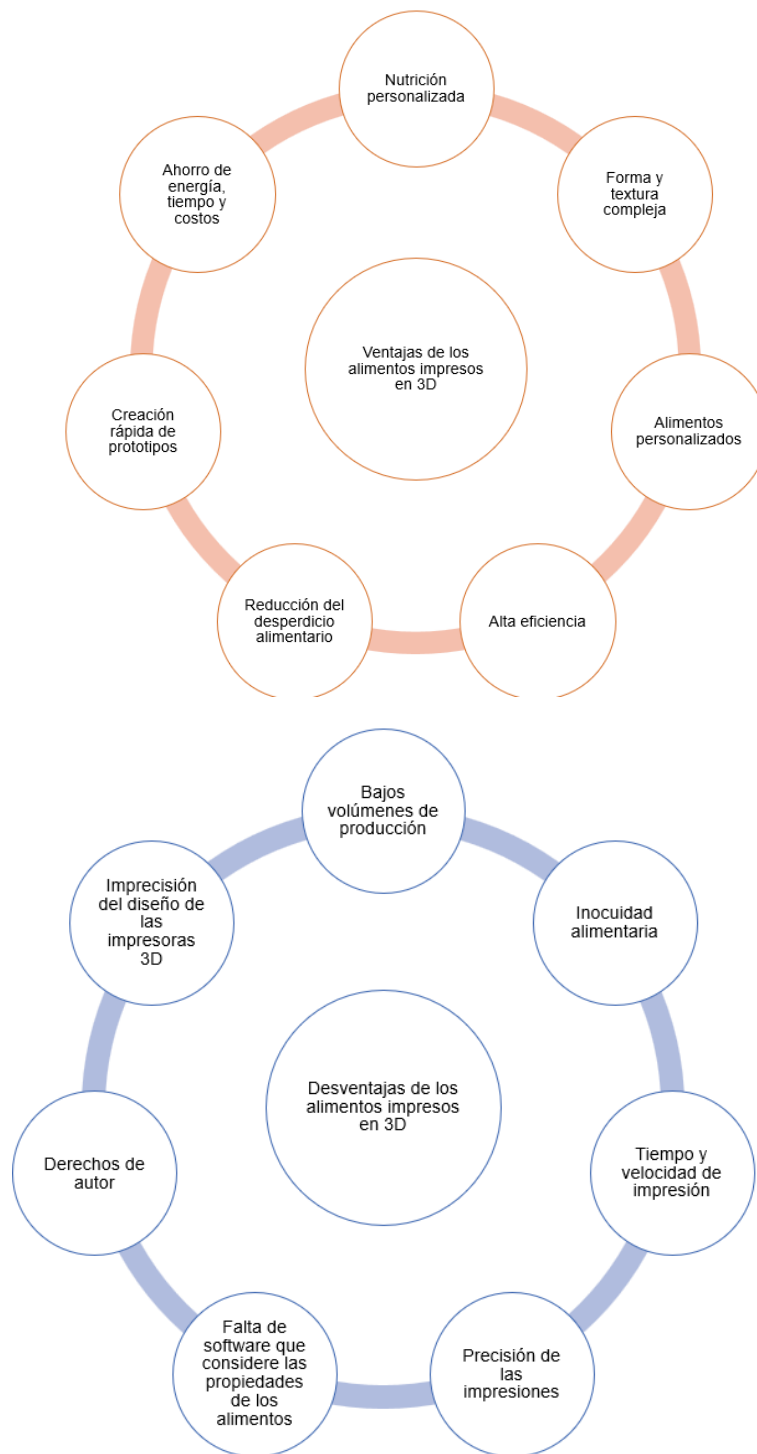
LEE, Z.J., XIE, C., DUAN, X., NG, K. y SULERIA, H.A.R. 2024. Optimization of Ultrasonic Extraction Parameters for the Recovery of Phenolic Compounds in Brown Seaweed: Comparison with Conventional Techniques. [en línea] Antioxidants Vol. 13 <<https://doi.org/10.3390/antiox13040409>> [consulta: 20 octubre 2024]

JAKOBEK, L. 2015. Interactions of polyphenols with carbohydrates, lipids and proteins. [en línea] Food Chemistry Vol. 175 <<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.12.013>> [consulta: 19 julio 2024]

GARBOCCI, B. 2022. Hidrocoloides presentes en algas comestibles y su interacción con proteínas de origen animal. Trabajo final de grado teórico para optar a la Licenciatura en Ciencia y Tecnología de Alimentos. Argentina, Universidad Nacional de la Plata, Facultad de Ciencias Exactas. 18p.

LUPO, B., González, C., y Maestro, A. 2012. Microencapsulación con alginato en alimentos. Técnicas y aplicaciones. [en línea] Rev. Venez. Cienc. Technol. Aliment. Vol. 3 <ISSN: 2218-4384> [consulta: 19 julio 2024]

VI. ANEXOS



Anexo 1. Ventajas y desventajas de la impresión 3D de alimentos
Fuente: Tomašević et al. (2021)

Anexo 2. Ejemplos de productos con aplicación de tecnología impresión 3D

Producto con tecnología de impresión 3D	Fuente
Snack en base a fruta personalizado para aportar entre el 5-10% del energía, calcio, hierro y vitamina D en niños entre 3 y 10 años de edad.	Baiano, 2020
Batido de frutas y verduras con actividad antioxidante sin cambios durante 8 días almacenado a 5°C.	Baiano, 2020
Estructuras Saludables ricas en fibra y proteínas, pero bajas en grasa y azúcar.	Baiano, 2020
Concentrado de naranja y mezcla de almidón de trigo enriquecido con vitamina D.	Baiano, 2020
Estructuras de un alimento en base a cereal con probióticos.	Baiano, 2020
Puré de papas con <i>Bifidobacterium animalis subsp. Lactis</i> .	Baiano, 2020
Batido de frutas y verduras con la adición de colágeno de pescado.	Tomašević et al., 2021
Producto de yema de huevo y albúmina con harina de arroz.	Tomašević et al., 2021
Snack en base a fruta con porotos blancos, setas <i>Boletus edulis</i> y leche descremada como buena fuente de hierro, vitamina D y calcio en niños.	Tomašević et al., 2021
Snack de cereal con la incorporación de <i>Chlorella vulgaris</i> y <i>Arthrospira platensis</i> para preservar el color y mejorar la impresión del producto, así como la aceptabilidad del consumidor.	Tomašević et al., 2021
Polvo del hongo <i>Cordyceps militaris</i> , rico en compuestos bioactivos (e.g cordicepina, polisacáridos, entre otros), mejoran la rehidratación y propiedades sensoriales.	Tomašević et al., 2021

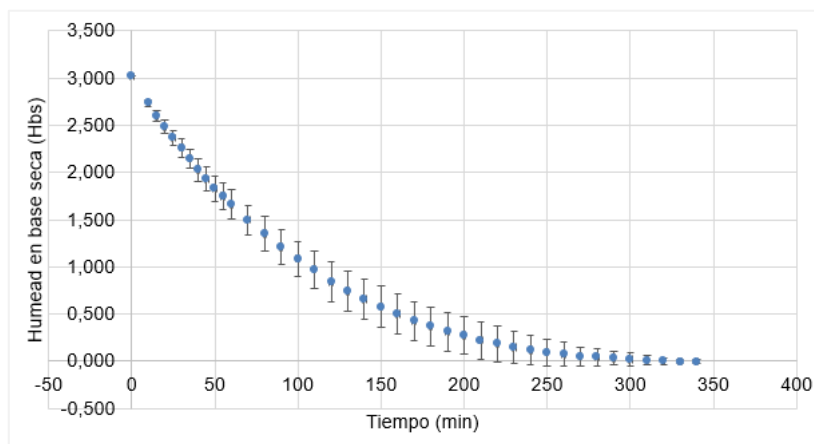
Anexo 3. Criterios de clasificación de micro y macroalgas

Clasificación	Criterios
Microalgas	<ul style="list-style-type: none"> - Aspectos citológicos y morfológicos. - Tipo de reserva de metabolitos. - Componentes de la pared celular. - Pigmentos.
Macroalgas	<ul style="list-style-type: none"> - Características químicas y morfológicas, en particular la presencia de pigmentos específicos.

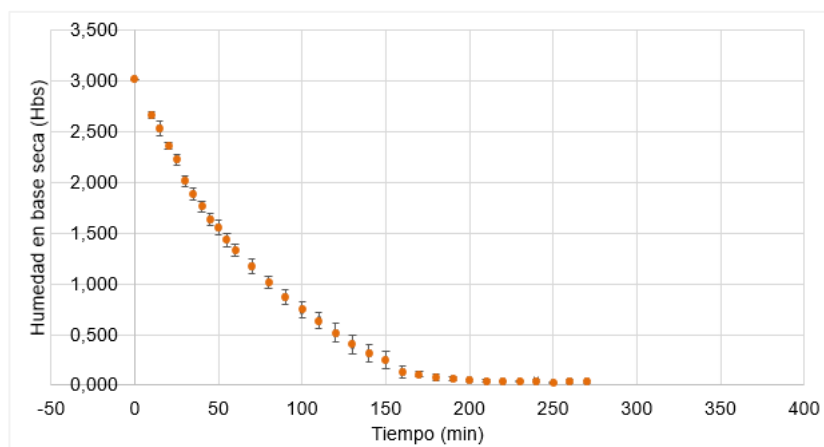
Fuente: Ścieszka et al. (2019)

Anexo 4. Muestras según método de secado y condición de temperatura

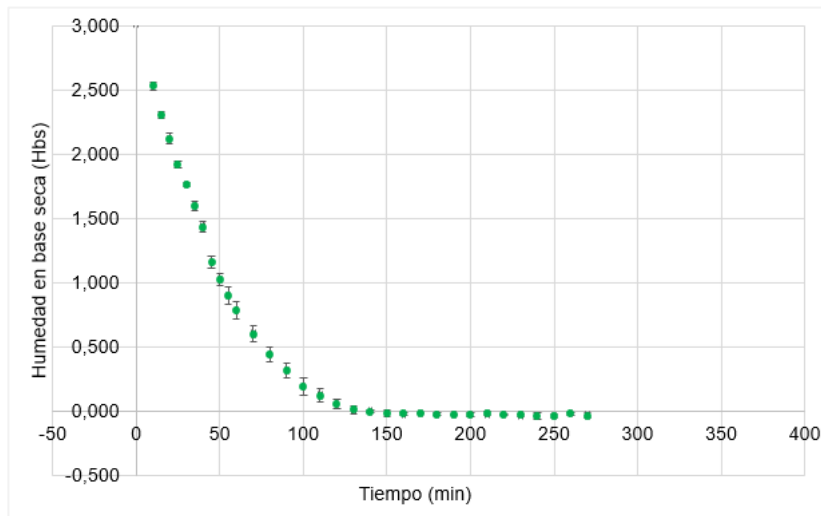
Método de secado	Temperatura	N° total de muestras
Control (fresco)	-	21
Horno	40°C	6
	60°C	6
	80°C	6
Aire forzado	40°C	3
	60°C	3
	80°C	3
Liofilizador	-55°C 0,021 mbar	3



Anexo 5. Humedad en base seca del producto impreso en 3D sometido a 40°C en horno



Anexo 6. Humedad en base seca del producto impreso en 3D sometido a 60°C en horno



Anexo 7. Humedad en base seca del producto impreso en 3D sometido a 80°C en horno

