



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

INSTITUTO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

MAESTRÍA EN CIENCIA DE LOS ALIMENTOS

TESIS

**EVALUACIÓN DEL EFECTO ANTICANCERÍGENO DE
BETA-GLUCANOS EXTRAÍDOS DE CEBADA (*Hordeum vulgare*) Y
AVENA (*Avena sativa*)**

Para obtener el grado de
Maestra en Ciencia de los Alimentos

PRESENTA

L. I. A. Arely Vega Domínguez

Directora
Dra. Aurora Quintero Lira

Co-Director
Dr. Javier Piloni Martini

Tulancingo de Bravo, Hgo., México, octubre 2025



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Instituto de Ciencias Agropecuarias
Institute of Agricultural Sciences
Área Académica de Ingeniería Agroindustrial e Ingeniería en Alimentos
Academic Area of Agroindustrial Engineering and Food Engineering

Asunto: Autorización de impresión de tesis

El Comité Tutorial de la **Tesis** titulada “**Evaluación del efecto anticancerígeno de beta-glucanos extraídos de cebada (*Hordeum vulgare*) y avena (*Avena sativa*)**”, realizada por la sustentante **Arely Vega Domínguez** con número de cuenta **260477** perteneciente al programa de **Maestría en Ciencia de los Alimentos**, una vez que ha revisado, analizado y evaluado el documento recepcional, y de acuerdo con lo estipulado en el Artículo 110 del Reglamento de Estudios de Posgrado, tiene a bien extender la presente:

AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

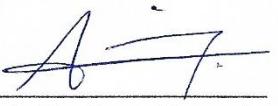
Por lo que la sustentante deberá cumplir los requisitos establecidos en el Reglamento de Estudios de Posgrado para la defensa oral en el examen de grado correspondiente.

Atentamente
“Amor, Orden y Progreso”
Tulancingo de Bravo, Hidalgo, a 22 de octubre de 2025
El Comité Tutorial


Dra. Aurora Quintero Lira
Directora


Dr. Javier Piloni Martini
Codirector


Dra. Teresita Spezzia Mazzocco
Miembro del comité


Dr. Rubén Jiménez Alvarado
Miembro del comité



“Amor, Orden y Progreso”

 2025

 Times
Higher
Education



Avenida Universidad #133, Col. San Miguel Huatengo,
Santiago Tulantepec de Lugo Guerrero, Hidalgo,
México. C.P. 43775
Teléfono 7717172000 Ext.42021
maestria_alimentos@uaeh.edu.mx
uaeh.edu.mx

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	iv
ÍNDICE DE TABLAS	v
RESUMEN	vi
ABSTRACT	vii
1. INTRODUCCIÓN	1
2. MARCO TEÓRICO	2
2.1 β-glucanos	2
2.2 Cebada	3
2.2.1 Producción mundial y nacional de la cebada	3
2.2.2 Composición química del grano de cebada	4
2.2.3 Estructura del grano de cebada	5
2.3 Avena	6
2.3.1 Producción mundial y nacional de la avena	6
2.3.2 Composición química del grano de avena	7
2.3.3 Estructura del grano de avena	8
2.4 Métodos de extracción de β-glucanos	9
2.5 Mecanismos de acción de los β-glucanos	10
2.6 Cáncer	16
2.6.1 Línea celular MDA-MB-231	18
2.7 Concentración inhibitoria 50 (IC ₅₀)	19
3. JUSTIFICACIÓN	20
4. HIPÓTESIS	21
5. OBJETIVOS	22
5.1 Objetivo general	22
5.2 Objetivos específicos	22
6. MATERIALES Y MÉTODOS	23
6.1 Obtención de la materia prima	23
6.2 Análisis químico proximal de los granos de cebada y avena	23
6.2.1 Determinación de humedad	23
6.2.2 Determinación de cenizas	23
6.2.3 Determinación de grasa	24
6.2.4 Determinación de fibra cruda	24

6.2.5 Determinación de proteína cruda	25
6.3 Extracción de β-glucanos de los granos de cebada y avena	26
6.3.1 Pretratamiento del grano	26
6.3.2 Extracción de β-glucanos	27
6.3.3 Purificación de los β-glucanos	27
6.4 Rendimiento de extracción y cuantificación de β-glucanos de cebada y avena.....	28
6.5 Efecto anticancerígeno de los β-glucanos en la línea celular MDA-MB-231.....	31
6.5.1 Preparación de medio de cultivo Leibovitz L-15	31
6.5.2 Cultivo celular	31
6.5.3 Preparación de tratamiento de β-glucanos.....	32
6.5.4 Viabilidad celular con ensayo MTT	33
6.6 Análisis estadístico	34
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	35
7.1 Químico proximal de los granos de cebada y avena	35
7.2 Porcentaje de rendimiento y pureza de los β-glucanos de cebada y avena	37
7.3 Viabilidad de las células MDA-MB-231 con los β-glucanos de cebada y avena.....	39
7.4 Efecto de los β-glucanos de cebada y avena en la morfología celular	43
7.5 Concentración inhibitoria 50 (IC_{50}) de los β-glucanos en la línea celular MDA-MB-231	44
8. CONCLUSIONES.....	46
9. REFERENCIAS	47
10. ANEXOS	53

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Estructura general de los β -glucanos de los hongos	2
Figura 2: Estructura general de los β -glucanos de las levaduras.....	2
Figura 3: Estructura general de los β -glucanos de los cereales	3
Figura 4. Porcentaje de producción mundial de cebada en cada continente en el 2023.....	4
Figura 5. Estructura del grano de cebada	5
Figura 6. β -glucanos presentes en la aleurona y endospermo en el grano de cebada.....	6
Figura 7. Porcentaje de producción mundial de avena en cada continente en el 2023	7
Figura 8. Estructura del grano de avena	8
Figura 9. β -glucanos presentes en la aleurona y subaleurona en el grano de avena.....	9
Figura 10. Efecto de la cavitación en el ultrasonido	10
Figura 11. Interacción de los β -glucanos con la piel humana	12
Figura 12. Etapas del ciclo celular	14
Figura 13. Mecanismo de acción de los β -glucanos en células cancerígenas en la fase G1 por la vía ERK 1/2	15
Figura 14. Mecanismo de acción de los β -glucanos en las células cancerígenas a partir de la inhibición de la telomerasa	16
Figura 15. Tipos de cáncer más comunes a nivel mundial en el 2020	17
Figura 16. Línea celular MDA-MB-231	18
Figura 17. Receptores de las células de cáncer y las células triple negativas	18
Figura 18. Precipitación del polvo de cebada después del pretratamiento con etanol, observando el sobrenadante con pigmentos, grasa y proteínas	26
Figura 19. Extracción de β -glucanos por baño ultrasónico	27
Figura 20. Precipitación de β -glucanos con etanol.....	28
Figura 21: β -glucano de avena seco y molido	28
Figura 22. Kit de ensayo de enlace mixto "Megazyme" para cuantificación de β -glucanos de cebada y avena	29
Figura 23: Fundamento del proceso del kit de ensayo de enlace mixto "Megazyme"	29
Figura 24. Esquema que muestra el proceso de esterilización por filtración del medio Leibovitz L-15	31
Figura 25. Proceso de crecimiento de la línea celular, conteo y sembrado a la placa de 96 pocillos	32
Figura 26. Tratamientos y dosis de β -glucanos aplicados en células MDA-MB-231	33
Figura 27. Cristales de formazan realizado por las células viables	33
Figura 28: Viabilidad celular de MDA-MB-231 con extracciones de β -glucanos de cebada después de 24 h, n=4	40
Figura 29: Viabilidad celular de MDA-MB-231 con extracciones de β -glucanos de cebada y β -glucano comercial después de 24 h, n=4	41
Figura 30: Viabilidad celular de MDA-MB-231 con extracciones de β -glucanos de avena después de 24 h, n=4	42
Figura 31: Viabilidad celular de MDA-MB-231 con extracciones de β -glucanos de avena y β -glucano comercial después de 24 h, n=4	43
Figura 32: Imágenes de la línea celular MDA-MB-231 a través de microscopio con el objetivo 40x	44

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición química del grano de cebada	4
Tabla 2. Composición química del grano de avena.....	8
Tabla 3. Aplicación de β -glucanos en productos alimentarios	10
Tabla 4. Aplicaciones de glucanos en el área de farmacéutica	11
Tabla 5. Estudios de β -glucanos en células cancerígenas mediante estudio <i>in vitro</i>	13
Tabla 6. Categorías de cáncer de mama según sus receptores y su terapia posible.....	17
Tabla 7. Análisis químico proximal de granos de cebada y avena	36
Tabla 8. Porcentaje del rendimiento y pureza de las extracciones de β -glucanos de cebada y avena	38

RESUMEN

Los β -glucanos son polisacáridos presentes de forma natural en cereales, hongos, levaduras y algas marinas. Entre los cereales, se encuentran en mayor proporción en la cebada (*Hordeum vulgare*) y avena (*Avena sativa*). Estos β -glucanos tienen efectos beneficiosos para la salud y se han considerado para la inhibición de las células cancerígenas en los últimos veinte años. En la presente investigación, se realizó una caracterización química proximal para determinar la concentración de humedad, cenizas, grasa, fibra y proteína en granos de cebada y avena. Para la extracción de β -glucanos, se empleó un método de baño ultrasónico asistido con una amplitud del 100 %, una temperatura de $30\pm1^{\circ}\text{C}$, una frecuencia de 20 kHz y una relación soluto-solvente de 1:25, utilizando agua destilada como solvente, con variables de tiempo de 10, 20 y 30 min, los cuales se determinó en cada uno el porcentaje de pureza obtenido mediante un kit de prueba de β -glucanos (enlace mixto) de la marca "Megazyme". El tratamiento más efectivo en la relación pureza y rendimiento de las dos fuentes fue el de 20 min, obteniendo 81.39 y 83.16% de β -glucanos en la cebada y la avena, respectivamente. Se utilizó la aplicación de β -glucanos comerciales de alta pureza ($\geq 95\%$) para comprobar su efecto anticancerígeno y los β -glucanos extraídos de cebada y avena se orientaron a la inhibición de células de cáncer de mama (MDA-MB-231) a diferentes concentraciones (0, 125, 250 y 500 μg de β -glucanos/mL) en un estudio *in vitro* de 24 horas, utilizando un ensayo colorimétrico para evaluar la viabilidad celular basada en la actividad metabólica (MTT) y comparar el efecto de cada fuente y tratamiento. El empleo de 500 $\mu\text{g}/\text{mL}$ del β -glucano comercial redujo la viabilidad celular hasta un 70.84%, seguido del β -glucano de avena con 72.74% y de cebada con 74.59% (a la misma concentración de 500 $\mu\text{g}/\text{mL}$ por 20 min), dando lugar al efecto anticancerígeno de β -glucano de avena y cebada aplicados en esta línea celular de cáncer de mama.

Palabras clave: β -glucanos, cebada, avena, ultrasonido, cáncer

ABSTRACT

β -glucans are polysaccharides naturally present in cereals, fungi, yeasts, and seaweed. Among cereals, they are found in the highest proportion in barley (*Hordeum vulgare*) and oats (*Avena sativa*). These β -glucans have beneficial effects on health and have been considered for the inhibition of cancer cells in the last twenty years. In the present study, a proximate chemical characterization was performed to determine the concentrations of moisture, ash, fat, fiber, and protein in barley and oat grains. For the extraction of β -glucans, an assisted ultrasonic bath method was used with an amplitude of 100%, a temperature of $30 \pm 1^\circ\text{C}$, a frequency of 20 kHz and a solute-solvent ratio of 1:25, using distilled water as solvent, with time variables of 10, 20 and 30 min, which in each one the percentage of purity obtained was determined using a β -glucan test kit (mixed bond) of the brand "Megazyme". The most effective treatment in the purity and yield ratio of the two sources was 20 min, obtaining 81.39 and 83.16% of β -glucans in barley and oats, respectively. The application of high purity commercial β -glucans ($\geq 95\%$) was used to verify their anticancer effect and β -glucans extracted from barley and oats were aimed at inhibiting breast cancer cells (MDA-MB-231) at different concentrations (0, 125, 250 and 500 μg of β -glucans/mL) in a 24-hour *in vitro* study, using a colorimetric assay to evaluate cell viability based on metabolic activity (MTT) and compare the effect of each source and treatment. The use of 500 $\mu\text{g}/\text{mL}$ of commercial β -glucan reduced cell viability to 70.84%, followed by oat β -glucan with 72.74% and barley with 74.59% (at the same concentration of 500 $\mu\text{g}/\text{mL}$ for 20 min), giving rise to the anticancer effect of oat and barley β -glucan applied in this breast cancer cell line.

Keywords: β -glucans, barley, oats, ultrasound, cancer

1. INTRODUCCIÓN

Los β -glucanos están compuestos por glucosa y se encuentran unidos mediante enlaces glucosídicos tipo β (Bai *et al.*, 2019), los cuales están presentes en diferentes fuentes como los cereales, hongos, levaduras y algas marinas (Wu *et al.*, 2021). Dentro de los cereales con mayor contenido de β -glucanos está la cebada (*Hordeum vulgare*) con concentraciones que varían entre el 5 y el 11%, y la avena (*Avena sativa*) entre el 4.5 y el 5.5%, los cuales se encuentran ubicados en la capa de la aleurona de cada grano (Bobade *et al.*, 2021). Se utilizan métodos convencionales para la extracción de β -glucanos, como son la aplicación de agua caliente, extracción en medio ácido, alcalino y enzimático. También se utilizan métodos no convencionales, destacando el uso del ultrasonido, además de ser un método ecológico, se obtiene mayor rendimiento en menor tiempo, utilizando el efecto de la cavitación (Alzorqi *et al.*, 2017; Liu *et al.*, 2021).

Desde inicios del siglo XXI, los β -glucanos han sido considerados como compuestos bioactivos debido a los diferentes efectos aplicados en áreas como farmacéutica, cosmética, alimentaria y salud (Bai *et al.*, 2019). Dentro de esta última área se ha resaltado el efecto anticancerígeno, debido a que los β -glucanos inhiben el crecimiento celular, provocando la interrupción del ciclo celular en diferentes fases y puntos de control, favoreciendo el aumento de la apoptosis (Varnosfaderani *et al.*, 2024). El cáncer es considerado la primera causa de muerte de millones de personas a nivel mundial, en el 2020 el cáncer de mama fue el más común en la población, con 2.2 millones de casos (OMS, 2020). El subtipo más agresivo es el cáncer de mama triple negativo (TNBC) y representa entre el 10 y el 20% de los casos de cáncer de mama. La línea celular MDA-MB-231 es la más estudiada y carecen de los receptores para estrógenos, progesterona y la proteína HER2, lo que presenta resistencia a diferentes tratamientos clínicos como la inmunoterapia, la hormonoterapia y la terapia hormonal (Chew *et al.*, 2020; Palmero-Picazo *et al.*, 2021).

De acuerdo a lo anterior, este estudio tuvo como finalidad extraer β -glucanos a partir de granos de cebada y avena, y compararlos con un β -glucano comercial mediante un estudio *in vitro* en células de cáncer de mama triple negativo (MDA-MB-231), en busca de propiedades anticancerígenas.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 β -glucanos

Los β -glucanos son polisacáridos compuestos por monómeros de D-glucosa unidos mediante enlaces glucosídicos tipo β (Bai *et al.*, 2019), y dependiendo de su fuente presentan diferencias en su estructura, grados de ramificación y peso molecular. Los hongos (*Lentinula spp.*, *Pleurotus spp.*), donde su estructura se compone de una cadena lineal con enlaces β -(1,3) y con ramificaciones cortas de β -(1,6) como se observa en la Figura 1, mientras que las levaduras (*Saccharomyces cerevisiae*) poseen la misma estructura, pero con ramificaciones más largas, como se observa en la Figura 2, por otro lado, los cereales como la cebada (*Hordeum vulgare*), la avena (*Avena sativa*) y el trigo (*Triticum spp.*) se componen de una cadena lineal sin ramificaciones, donde en su mayoría posee de dos a tres enlaces β -(1,4) consecutivos y separados por un enlace β -1,3, como se observa en la Figura 3 (Bai *et al.*, 2019; Bobade *et al.*, 2021; Chiozzi *et al.*, 2021; Wu *et al.*, 2021). El cereal que posee una mayor concentración de β -glucanos es el grano de cebada aproximadamente entre 5 y 11% de su composición total seguido de la avena entre el 4.5 y 5.5% (Bobade *et al.*, 2021).

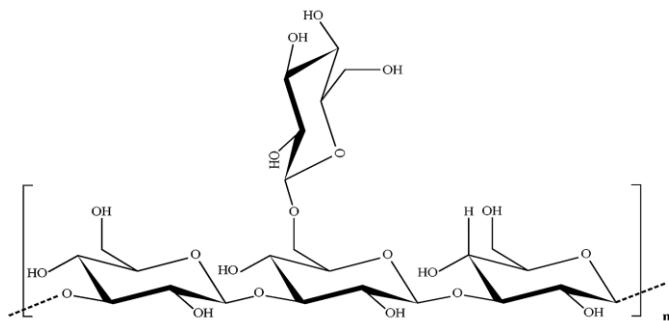


Figura 1: Estructura general de los β -glucanos de los hongos. Fuente: Varnosfaderani *et al.*, (2024)

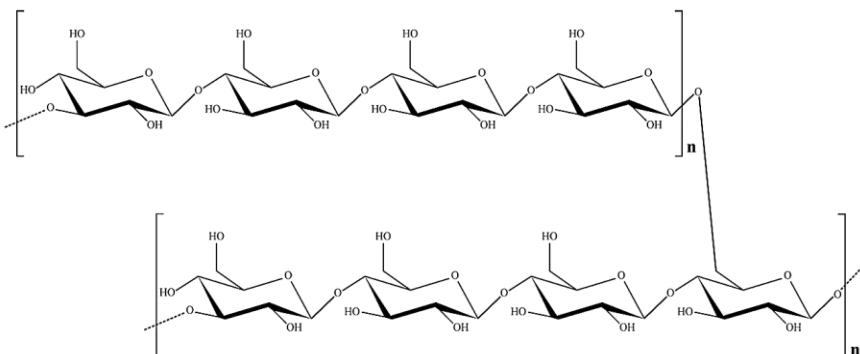


Figura 2: Estructura general de los β -glucanos de las levaduras. Fuente: Varnosfaderani *et al.*, (2024)

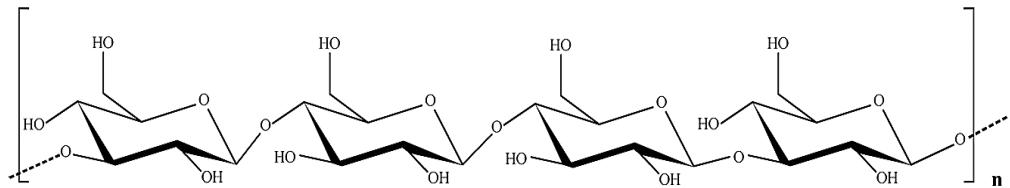


Figura 3: Estructura general de los β -glucanos de los cereales. Fuente: Varnosfaderani *et al.*, (2024)

2.2 Cebada

La cebada pertenece a la familia *Poaceae* y género *Hordeum*, y de acuerdo con evidencia arqueológica este cereal tiene como origen en Egipto y desde hace 17,000 años se ha utilizado como fuente de alimento (Idehen *et al.*, 2017; Simón & Golik, 2022). Siendo un cultivo con resistencia a condiciones adversas como la sequía, el frío y la madurez temprana de la planta, de este modo se posiciona en el cuarto lugar de producción de cereales a nivel global después del maíz, trigo y arroz (Simón & Golik, 2022).

2.2.1 Producción mundial y nacional de la cebada

En el 2023, se cultivaron 46,254,750 hectáreas de cebada, obteniendo una producción mundial de 145,759,524.48 toneladas. Entre los continentes productores, América es el tercer continente productor superado por Europa y Asia (FAO, 2024), como se puede observar en la Figura 4. Alrededor del 60% de la cosecha se destina para forraje animal, el 30% se emplea en el proceso de malteado para la producción de cerveza y únicamente el 2 o 3% se utiliza para consumo directamente (INIFAP, 2023). En el mismo año, México sembró una superficie de 297,445 hectáreas de cebada en el que se obtuvo una producción de 832,037.28 toneladas. Los principales estados productores en el ciclo temporal que abarca de primavera a verano fueron Estado de México, Hidalgo, Puebla y Tlaxcala, mientras que en el ciclo de otoño a invierno destacaron Guanajuato, Querétaro, Michoacán y Jalisco (INIFAP, 2023; FAO, 2024).

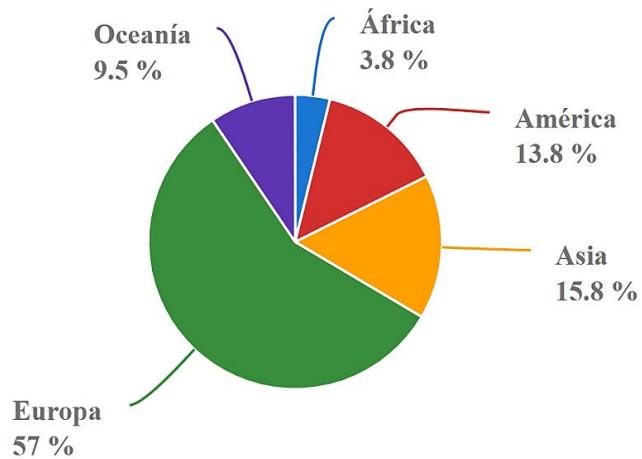


Figura 4. Porcentaje de producción mundial de cebada en cada continente en el 2023. Fuente: FAO, (2024)

2.2.2 Composición química del grano de cebada

La composición del grano de cebada maduro se puede observar en la Tabla 1, donde los componentes predominantes en peso seco son los carbohidratos, y de estos, el almidón constituye entre un 60 y 65%, actuando como principal fuente de energía para la germinación, en cantidades menores se encuentran los arabinoxilanos entre el 4.4 y el 7.8%, la celulosa entre 1.4 a 5%, mientras que la sacarosa, glucosa, fructosa y maltosa representan del 0.41 y 2.9%. Los lípidos están distribuidos en diferentes partes del grano y son utilizados principalmente para la funcionalidad de las células. Mientras que las proteínas se clasifican de acuerdo a su solubilidad, las albúminas son hidrosolubles, las globulinas son solubles en soluciones salinas, las glutelinas en soluciones ácidas o alcalinas y las glutelinas en alcohol. Por otro lado, los principales minerales presentes son: el fósforo, potasio, magnesio, calcio y sodio, en contraste, los niveles de hierro, zinc, cobre y manganeso pueden variar considerablemente de acuerdo con las condiciones en las que se cultive la planta y el manejo de fertilizantes (Izydorczyk & Dexter, 2015; Abewaw, 2021).

Tabla 1. Composición química del grano de cebada

Componente	Contenido (% peso seco)
Carbohidratos	78 - 83
Lípidos	2 - 3
Proteínas	8 - 15
Minerales	2 - 3

Fuente: Izydorczyk & Dexter, (2015)

2.2.3 Estructura del grano de cebada

El grano de la cebada está compuesto por la cáscara, pericarpo, aleurona, endospermo y embrión, como se observa en la Figura 5. La cáscara y el pericarpo son las capas externas que lo protegen y se compone de celulosa, hemicelulosa, lignina y lignanos. Mientras que la aleurona tiende a medir de 2 a 5 mm de grosor, y uno de sus componentes principales son los β -glucanos, los cuales se sitúan específicamente en esta capa y en el endospermo (Izydorczyk & Dexter, 2015; Schmidt, 2022; Lante & Canazza, 2023), como se observa en la Figura 6. El endospermo representa el 75% del grano aproximadamente, almacena lípidos y proteínas que son utilizados como fuente de nutriente para el desarrollo del embrión que protege. Al llegar a la madurez, tiende a disponer de una alta concentración de almidón que constituye el 80% del endospermo y está formado por amilosa y amilopectina (Izydorczyk & Dexter, 2015).

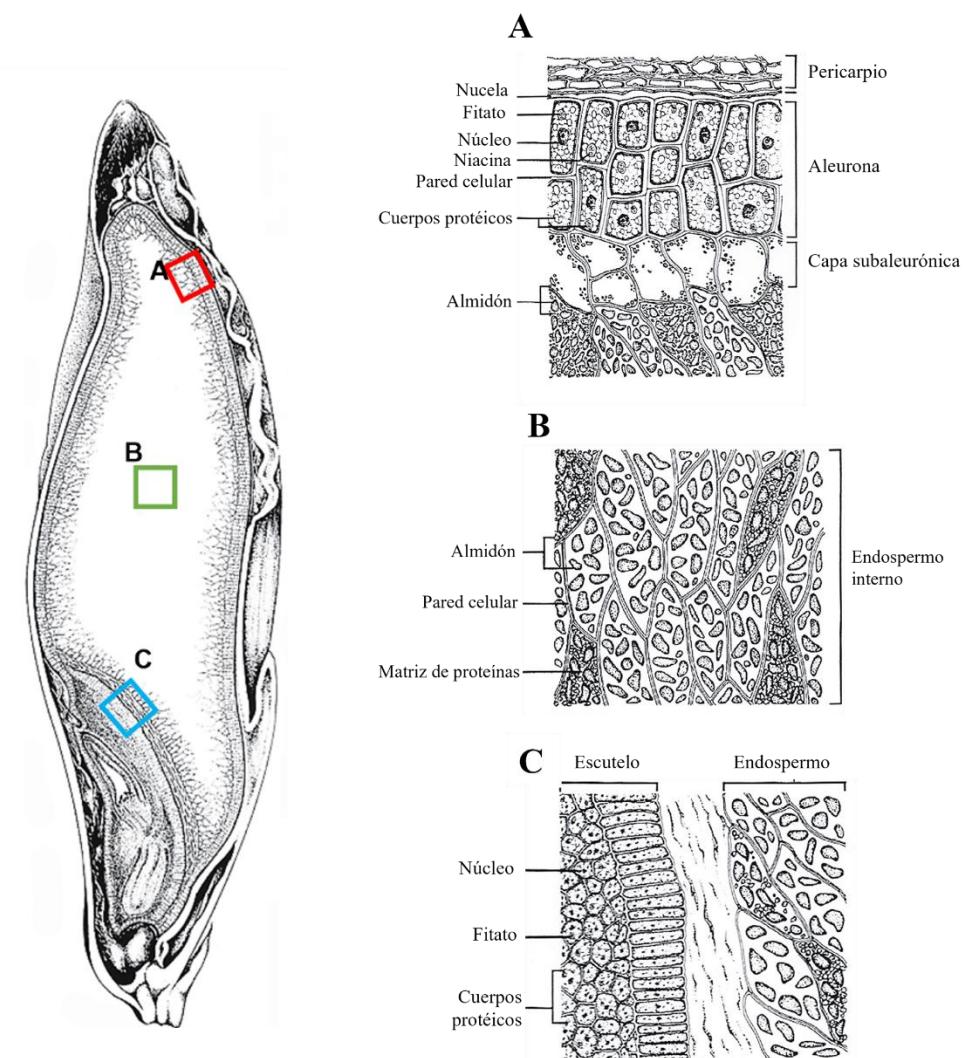


Figura 5. Estructura del grano de cebada, A) capa de salvado, B) endospermo y C) embrión. Fuente: Izydorczyk & Dexter, (2015)

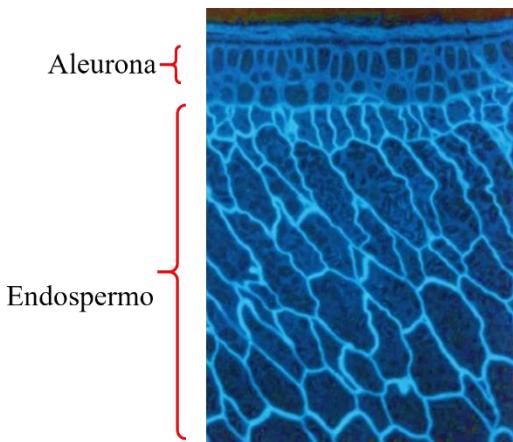


Figura 6. β -glucanos presentes en la aleurona y endospermo en el grano de cebada. Fuente: Schmidt, (2022)

2.3 Avena

La avena pertenece a la familia *Poaceae* y género *Avena*, abarcando 70 especies aproximadamente (Aly *et al.*, 2021), este cultivo se desarrolla mejor en climas fríos, debido a que es muy vulnerable a las temperaturas elevadas, especialmente durante las etapas de floración y formación del grano. Su crecimiento demanda una gran cantidad de agua debido a su elevada tasa de transpiración, prefiriendo suelos profundos y arcilloarenosos, con un contenido moderado de cal y buena capacidad para retener la humedad. Además, presenta buena adaptación a suelos ácidos, razón por la cual suele cultivarse en terrenos ricos en materia orgánica (Quiñones-Muñoz *et al.*, 2022). Considerado como uno de los cultivos más destacados del mundo, posicionándose en el sexto lugar seguido del maíz, trigo, cebada, arroz y sorgo (Terán-Céspedes *et al.*, 2023).

2.3.1 Producción mundial y nacional de la avena

En el año 2023, se cultivaron 8,024,447 hectáreas, de las cuales se obtuvo una producción de 18,776,750.11 toneladas, siendo el continente americano el segundo productor con un 28%, como se muestra en la Figura 7, del cual México cultivó 25,465 hectáreas, obteniendo 61,785.28 toneladas en el mismo año (FAO, 2024).

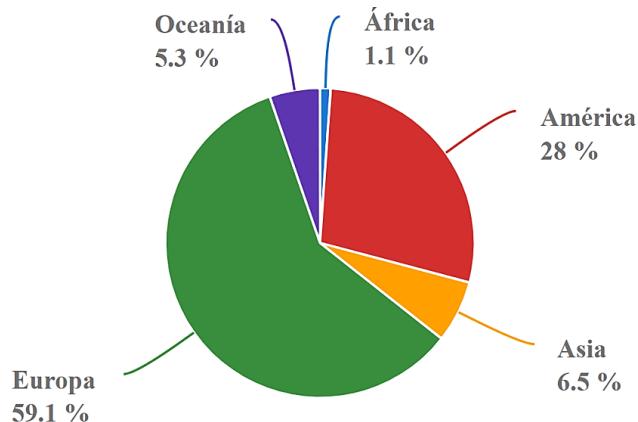


Figura 7. Porcentaje de producción mundial de avena en cada continente en el 2023. Fuente: (FAO, 2024)

Durante siglos la avena ha sido considerada como un alimento nutritivo, realizando productos como cereales, harina, barras de granola, galletas, comida infantil, entre otros, debido a su equilibrado contenido de proteínas, vitamina B y E. Además, destaca por sus diversos compuestos bioactivos, entre los que se incluyen polifenoles, esteroles, avenantramidas, compuestos fenólicos y β -glucanos (Aly *et al.*, 2021; Ihsan *et al.*, 2021).

2.3.2 Composición química del grano de avena

Los componentes del grano de avena se muestran en la Tabla 2, destacando que las proteínas representan el 13%, dentro de estas, las globulinas son las predominantes con un 55%, mientras que las prolaminas están presentes en menor proporción, y las aveninas, por su parte, tienen una concentración que varía entre el 10 al 13%. La avena es considerada un alimento funcional debido a su alto porcentaje lipídico en comparación con otros cereales, destacándose por la abundancia de ácidos grasos monoinsaturados como: el ácido oleico y poliinsaturados y ácido linoleico, también la presencia de triglicéridos, tales como: glucolípidos y esteroles. Por el contrario, la avena tiende a tener menos carbohidratos, el cual, el almidón representa el 60%, compuesto por amilosa y amilopectina. La fibra del grano se clasifica en un 60% como insoluble y en un 40% como soluble, dentro de la cual se encuentra los β -glucanos. Estos presentan enlaces β -1,3 en un 30% y los β -1,4 en un 70% de su cadena molecular (Alemayehu *et al.*, 2023).

Tabla 2. Composición química del grano de avena

Componente	Contenido (% peso seco)
Humedad	13.3
Proteínas	13
Lípidos	7.5
Fibra	10.3
Cenizas	3.1
Carbohidratos	52.8

Fuente: Butt *et al.*, (2008)

2.3.3 Estructura del grano de avena

El grano de la avena posee una textura suave, lo que puede llegar a complicar su molienda en ciertos procesos industriales. Está conformado por cáscara, salvado, endospermo y embrión, tal como se muestra en la Figura 8. La cáscara representa entre el 25 al 30% del total y puede ser utilizada para forraje de animales. Por otro lado, el salvado, que corresponde a la capa externa, está compuesto por el pericarpio y la aleurona. En esta última capa, los β -glucanos se distribuyen de manera heterogénea en las paredes celulares, situándose en mayor concentración en la capa de la aleurona y la subaleurona (Butt *et al.*, 2008; Schmidt, 2022), como se muestra en el Figura 9.

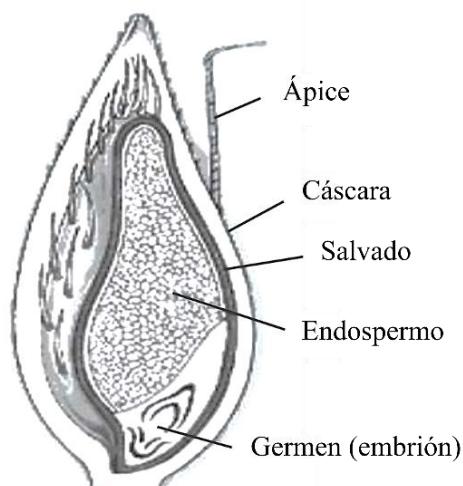


Figura 8. Estructura del grano de avena. Fuente: Butt *et al.*, (2008)

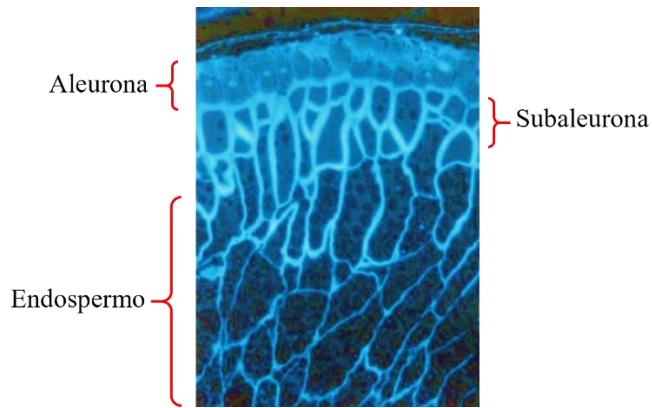


Figura 9. β -glucanos presentes en la aleurona y subaleurona en el grano de avena. Fuente: Schmidt, (2022)

2.4 Métodos de extracción de β -glucanos

Existen diversos métodos para la extracción de β -glucanos, entre los cuales se incluyen la extracción con agua caliente, en medios ácidos o alcalinos, mediante enzimas y por ultrasonido. La extracción con agua caliente se realiza a temperaturas cercanas a los 100°C. Sin embargo, presenta un rendimiento relativamente bajo al tiempo prolongado de exposición térmica requerido. Por otro lado, los métodos que emplean medios ácidos o alcalinos se utilizan principalmente para remover proteínas y polisacáridos hidrosolubles, aunque su uso excesivo puede comprometer la integridad estructural de los β -glucanos y, en consecuencia, afectar sus funciones biológicas. La extracción enzimática se considera una de las más eficaces para el aislamiento de β -glucanos, dado a que permite una alta solubilidad en agua sin alterar su estructura molecular, no obstante, requiere procesos de purificación complejos y costosos (Liu *et al.*, 2021). Por otro lado, la aplicación de ultrasonido se destaca como una alternativa más eficiente y sostenible, ya que ofrece mayor rendimiento, menor tiempo de procesamiento y un impacto ambiental menos agresivo en comparación con los métodos tradicionales (Alzorqi *et al.*, 2017; Liu *et al.*, 2021). Este método se fundamenta en el principio de la cavitación, mediante el cual se generan ondas ultrasónicas a frecuencias entre 20 a 100 kHz. Estas ondas generan vibraciones que provocan la formación de microburbujas que acumulan energía en su interior y migran hacia superficies sólidas presentes en el sistema de extracción. Estas microburbujas se expanden progresivamente a través de ciclos de compresión (presión alta) y rarefacción (presión baja) inducidos por las variaciones de presión acústica, hasta alcanzar un punto de inestabilidad, donde alcanzan un tamaño crítico que culmina en su implosión violenta. Esta liberación repentina de energía rompe las paredes celulares del material vegetal, facilitando así la liberación y transferencia de los β -glucanos hacia el disolvente, como se observa en la Figura 10 (Khan *et al.*, 2020).

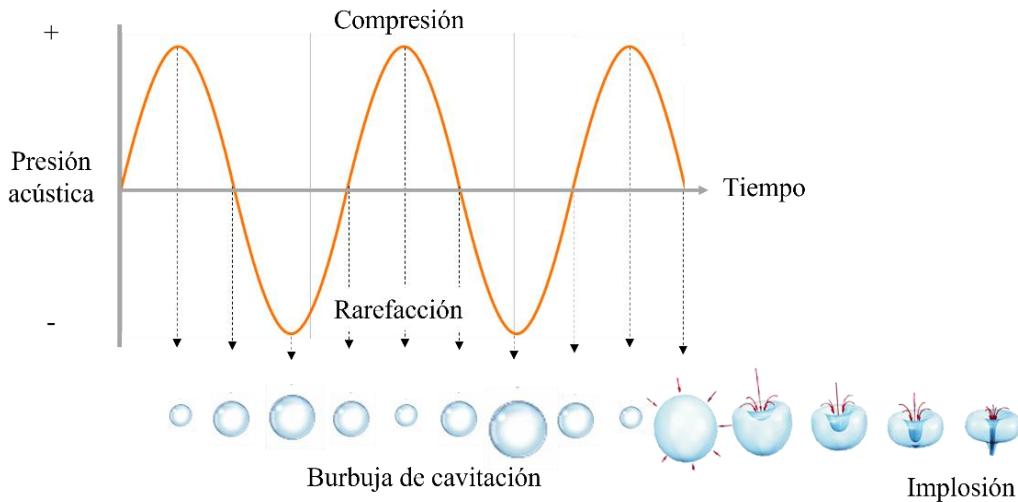


Figura 10. Efecto de la cavitación en el ultrasonido. Fuente: Autoría propia

2.5 Mecanismos de acción de los β -glucanos

Los β -glucanos están formados por monosacáridos simples, pero presentan diferencias en su grado de ramificación y conformaciones en su estructura, los cuales, están directamente vinculados con propiedades fisicoquímicas, funciones fisiológicas y propiedades organolépticas (Cui *et al.*, 2023). Los cuales son aplicados en diferentes áreas de la industria alimentaria por su efecto espesante en bebidas, también es utilizado como aditivo alimentario para reducir el colesterol en productos lácteos y pan (Bai *et al.*, 2019), algunos casos se pueden mostrar en la Tabla 3. Del mismo modo, son utilizados en la industria farmacéutica como complemento en formulaciones de vacunas, actuando como ligados para dianas específica, además, son aplicados como transporte para medicamentos (Lin *et al.*, 2024), como se puede visualizar en la Tabla 4.

Tabla 3. Aplicación de β -glucanos en productos alimentarios

Producto	β -glucano	Propiedades organolépticas	Propiedades fisiológicas
Bebidas lácteas y yogur	Avena	Aumento de capacidad de retención de agua y mejoró sus propiedades sensoriales	Reducción del colesterol
Leche fermentada	Avena	Separación de proteínas y polisacáridos incorporados en la modificación de gelificación	Reducción del colesterol sérico

Yogurt	Cebada	Mejoramiento de viscosidad, textura y perfil sensorial	-
Masa	Avena	Aumento de rigidez y disminución de extensibilidad	-
Pan	Avena	Sin cambios significativos	Reducción del índice glucémico y la carga glucémica
Bebidas	Avena	Aumento de la viscosidad y mayor estabilidad en la acidez y color	-

Fuente: Chiozzi *et al.*, (2021)

Tabla 4. Aplicaciones de glucanos en el área de farmacéutica

β-glucano	Estructura	Aplicaciones
<i>Ganoderma lucidum</i>	β-(1,3)-D-glucano	Aumento de defensa del sistema fagocítico contra agentes infecciosos y patógenos
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	β-(1,3)-D-glucano	Optimización de la absorción oral del fármaco exenatida
Cebada	β-(1,3), (1,4)-D-glucano	Dirección específica de las células M y estimulación de la respuesta inmunitaria mediante la administración oral del antígeno PR8, utilizando transportadores conjugados con β-glucano
<i>Schizophyllum commune</i>	β-(1,3), (1,6)-D-glucano	Administración de ARNi a células dendríticas mediante β-glucano y oligonucleótidos
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	β-(1,3)-D-glucano	Utilizado como transportador oral para ARNi

Fuente: Lin *et al.*, (2024)

Por otra parte, por su efecto hidratante, antienvejecimiento y cicatrizante se encuentran en productos dérmicos (Bai *et al.*, 2019). La relación que tiene los β-glucanos con la piel humana se puede observar en la Figura 11, donde, como primer paso, se aplica la formulación tópica a base de β-glucanos para favorecer su penetración en la epidermis. Luego, al ubicarse en la dermis, los polisacáridos son

detectados por receptores de los macrófagos, como la Dectina-1, lo que desencadena una respuesta inmunitaria, permitiendo la liberación de interleucinas (IL-1), y así, activando una cascada inflamatoria. Finalmente, en el tercer paso, se estimula la actividad de otras células cutáneas, como los fibroblastos dérmicos, que inducen la producción de componentes de la matriz extracelular, por ejemplo, el colágeno, y los queratinocitos epidérmicos, que promueven su migración y proliferación en procesos de cicatrización (Sousa *et al.*, 2023).

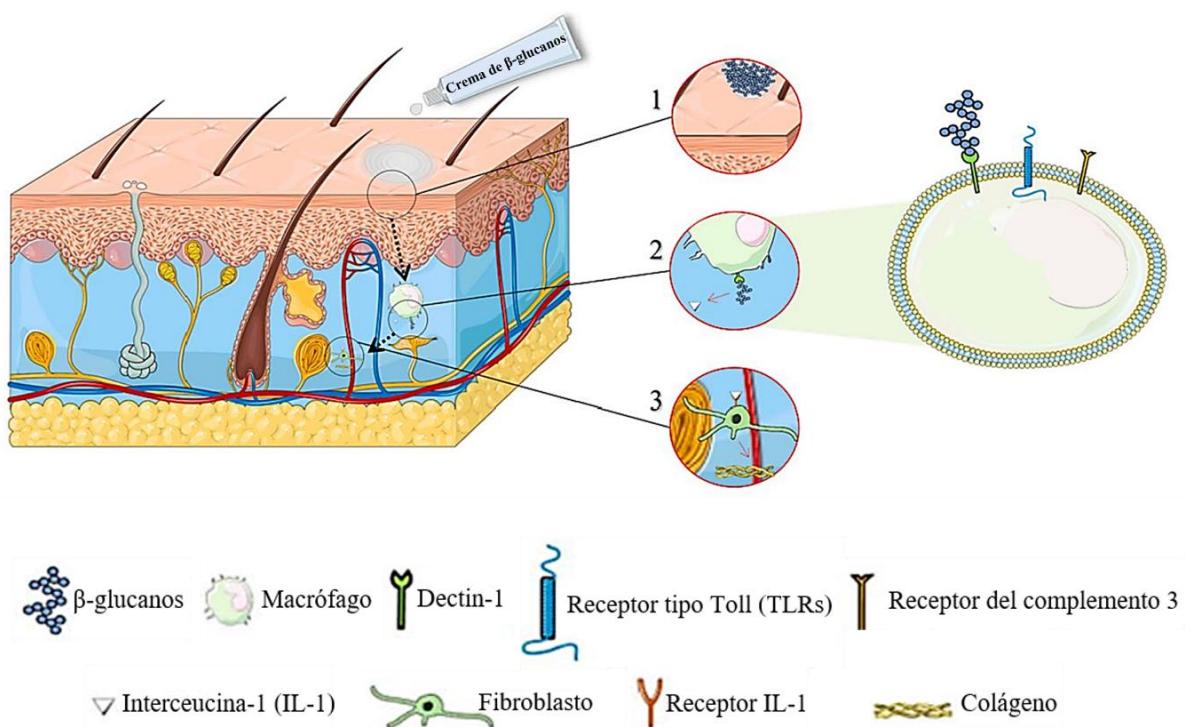


Figura 11. Interacción de los β -glucanos con la piel humana. Fuente: Sousa *et al.*, (2023)

Desde inicio del siglo XXI han sido considerados como compuestos bioactivos y han tenido gran importancia en el área de la salud debido a su actividad antiinflamatoria, antioxidante y anticancerígena (Choromanska *et al.*, 2018). Existen aplicaciones de β -glucanos en células de diferentes tipos de cáncer mediante estudio *in vitro*, como se puede observar en la Tabla 5.

Tabla 5. Estudios de β -glucanos en células cancerígenas mediante estudio *in vitro*

Fuente de extracción	Célula cancerígena	Dosis de β -glucano	Viabilidad		Referencia
			24 h	48 h	
Avena	Colon	HCT-116	0.88 μ g/mL	76%	(Climova <i>et al.</i> , 2021)
Cebada	Colon	HCT-116	500 μ g/mL	90%	(Lin <i>et al.</i> , 2018)
	Pulmón	A549	500 μ g/mL	82%	
Avena	Pulmón	A549	200 μ g/mL	69%	(Choromanska <i>et al.</i> , 2018)
Avena	Melanoma	HTB-140	200 μ g/mL	55%	(Parzonko <i>et al.</i> , 2015)

Mientras que, en el efecto anticancerígeno, los β -glucanos intervienen en distintas fases del ciclo celular. Este proceso es fundamental para la división celular, en la que se clasifica en cuatro fases, G1, S, G2 y M, como se puede observar en la Figura 12. En la fase G1, la célula experimenta un proceso de crecimiento y se habilita para la replicación del ADN. Durante la fase S, tiene lugar la replicación del material genético, lo que conduce a la duplicación de los cromosomas. Posteriormente, en la fase G2, la célula continúa con su crecimiento y lleva a cabo la preparación para su fase final. Finalmente, en la fase M, conocida como mitosis, se produce la división celular, dando origen a dos células hijas genéticamente idénticas (Almalki, 2023). Los β -glucanos interactúan con las células cancerígenas directamente en su crecimiento, provocando la interrupción de su ciclo celular en la fase G1 por la restricción de la vía ERK1/2 (Varnosfaderani *et al.*, 2024), tal como se muestra en la Figura 13, en el cual, la vía de señalización es inducida por mitógenos (MAPK) que a través de señales extracelulares activan las proteínas ERK (Extracellular Signal – Regulated Kinases) desde la membrana plasmática para unirse a receptores de tirosina quinasa (RTK), iniciando la cascada RAS-RAF-MEK-ERK, la cual progresá hasta el núcleo, donde regula procesos biológicos, como la proliferación celular. No obstante, los β -glucanos interfieren en esta última señalización, provocando la inhibición de dicha vía y bloqueando la transición de las células desde la fase G1 hasta la fase S, etapa en la que ocurre la replicación del ADN (Raemy *et al.*, 2024; Varnosfaderani *et al.*, 2024). Por otro lado, en la fase G2 los β -glucanos pueden provocar una acumulación gradual de células,

especialmente cuando se emplean en concentraciones elevadas. Sin embargo, este mecanismo no está completamente establecido en comparación con el de la fase G1 (Varnosfaderani *et al.*, 2024).

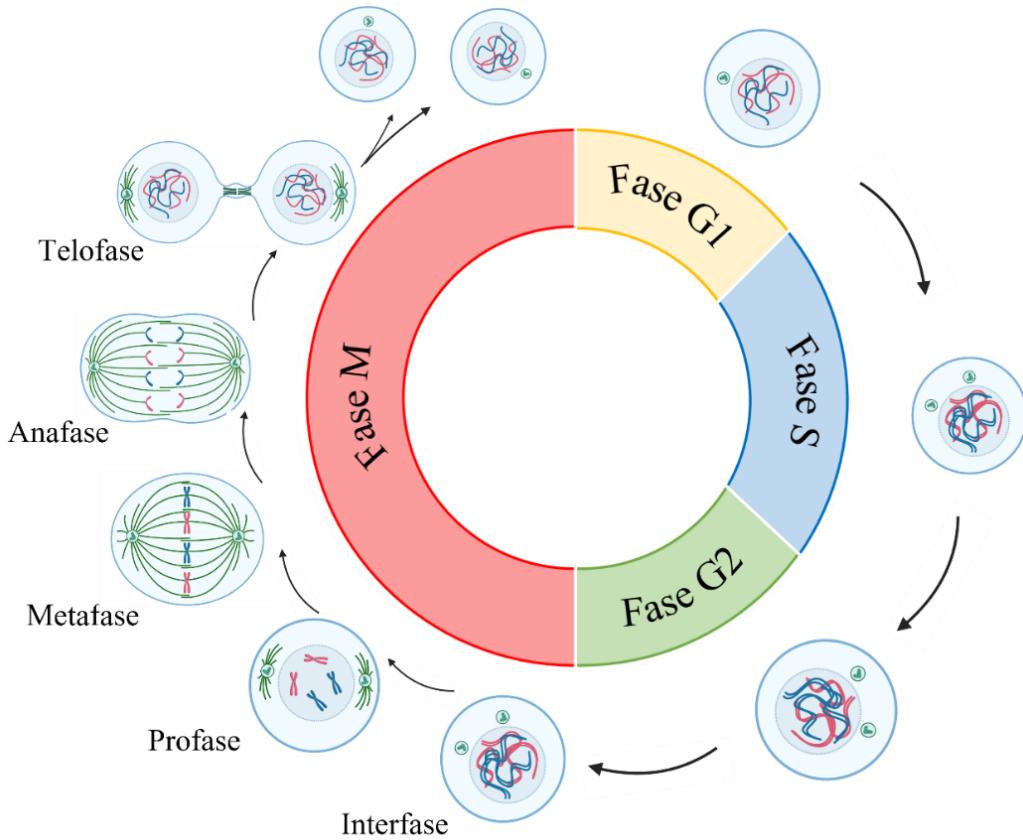


Figura 12. Etapas del ciclo celular. Fuente: Autoría propia

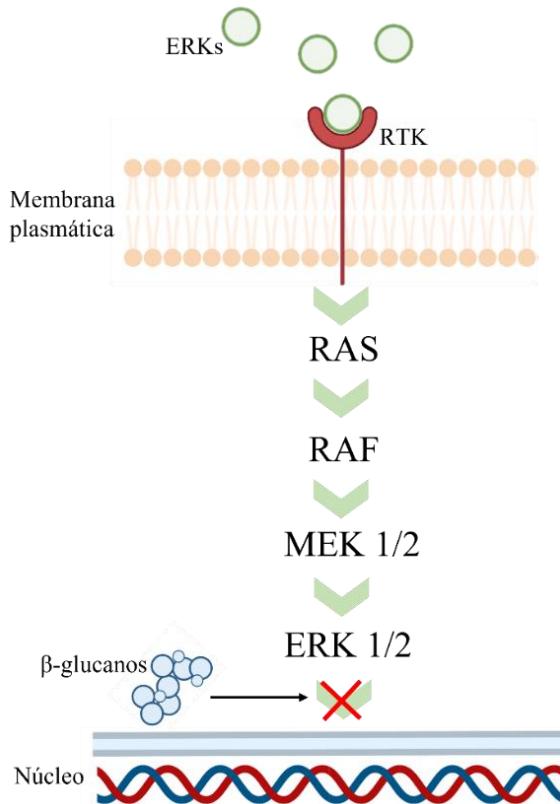


Figura 13. Mecanismo de acción de los β -glucanos en células cancerígenas en la fase G1 por la vía ERK 1/2. Fuente: Autoría propia

Además, se ha descrito otro mecanismo mediante el cual los β -glucanos inducen la apoptosis, a través de la inhibición de la enzima telomerasa, provocando daño en el ADN y estimulando un aumento en la expresión de la proteína p53. Esta proteína actúa como regulador clave de la detención del ciclo celular y de la activación de la apoptosis. A su vez, la p53 favorece la expresión de genes proapoptóticos como BAX, PUMA y NOVA, los cuales alteran la permeabilidad de la membrana mitocondrial. Como resultado, se libera citocromo C desde la mitocondria hacia el citosol, donde se asocia con la proteína Apaf-1 y con la pro-caspasa-9 para formar el complejo apoptósoma. Este complejo facilita la activación de la caspasa-9 que posteriormente activa las caspasas efectoras 3, 6 y 7, responsables de ejecutar el proceso apoptótico, como se observa en la Figura 14 (Rusin, 2024; Varnosfaderani *et al.*, 2024; Wu *et al.*, 2024).

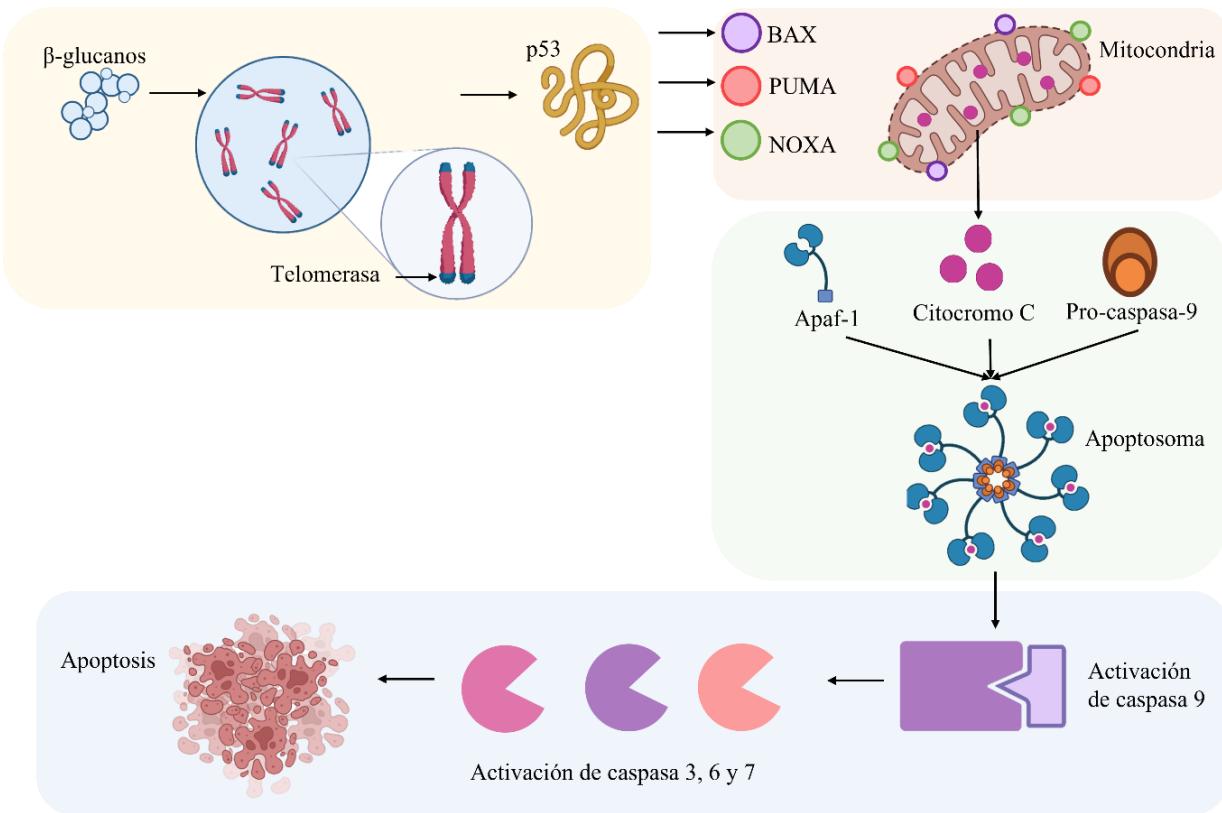


Figura 14. Mecanismo de acción de los β-glucanos en las células cancerígenas a partir de la inhibición de la telomerasa.
Fuente: Autoría propia

2.6 Cáncer

El cáncer es una enfermedad provocada por el crecimiento descontrolado de células anormales que pueden invadir partes adyacentes del cuerpo o propagarse a otros órganos, mejor conocido como metástasis, siendo la causa de muerte. Su origen puede atribuirse tanto a factores genéticos como a factores externos. Entre estos últimos se incluyen los físicos, como la exposición a rayos ultravioleta, los químicos como el asbesto que es utilizado para la elaboración de aislantes, las sustancias que componen al humo del tabaco, la presencia de micotoxinas en alimentos y el arsénico en agua, y los biológicos como: los virus (por ejemplo, el Virus de Papiloma Humano), bacterias (*Helicobacter pylori*) y parásitos (*Clonorchis sinensis*). En el 2020, el cáncer fue considerado la principal causa de muerte a nivel mundial con más de 10 millones de defunciones, donde los tipos de cáncer más común son el de mama y pulmón con 2.2 millones de casos, seguido del cáncer de colon, próstata, piel y estómago, como se observa en la Figura 15 (OMS, 2020).

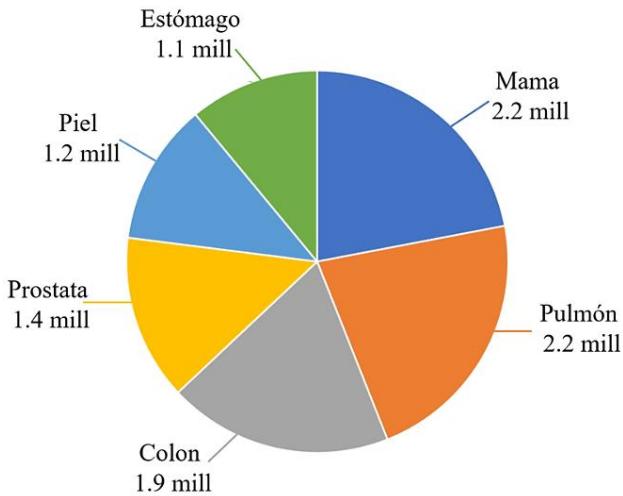


Figura 15. Tipos de cáncer más comunes a nivel mundial en el 2020. Fuente: OMS, (2020)

Las células de cáncer de mama presentan receptores ubicados en la superficie de la membrana, así como en el citoplasma y el núcleo. Los más relevantes están asociados a estrógenos, progesterona y la proteína HER2. En función de la presencia de estos receptores, el cáncer de mama puede clasificarse en categorías, como se puede observar en la Tabla 6 (Palmero-Picazo *et al.*, 2021).

Tabla 6. Categorías de cáncer de mama según sus receptores y su terapia posible

CATEGORÍA	RECEPTORES			TERAPIA
	Estrógeno	Progesterona	Proteína HER2	
Luminal A	+	+	-	Hormonal
Luminal B	Luminal			
	B/HER2 positivo	+	+	+
HER 2+	Luminal			
	B/HER2 negativo	+	+	-
Triple negativo	+	+	-	Inmunoterapia
	-	-	-	Quimioterapia

Fuente: Palmero-Picazo *et al.*, (2021)

2.6.1 Línea celular MDA-MB-231

El cáncer de mama triple negativo (CMTN) es considerado el subtipo más agresivo y constituye entre el 10 y el 20% de estos casos. Sin embargo, tanto este tipo como sus mecanismos oncogénicos aún no han sido ampliamente investigados (Chew *et al.*, 2020). Una de las líneas celulares que se encuentran dentro de esta categoría es la célula MDA-MB-231, la cual, se puede observar en la Figura 16. Aislada a partir de un derrame pleural con carcinoma ductal invasivo, y ampliamente utilizada como modelo experimental para el estudio del cáncer de mama. Presentan ausencia de los receptores de estrógeno, progesterona y proteínas HER2, como se muestra en la Figura 17, y son consideradas un fenotipo altamente invasivo en estudios *in vitro*. Asimismo, cuando se implantan de manera ortotópica, generan xenoinjertos que desarrollan metástasis de forma espontánea hacia los ganglios linfáticos (Welsh, 2017).



Figura 16. Línea celular MDA-MB-231. Fuente: ATCC, (2024)

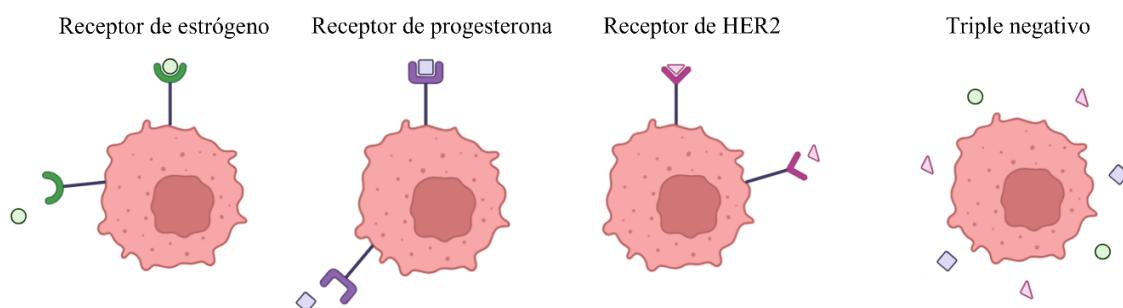


Figura 17. Receptores de las células de cáncer y las células triple negativas. Fuente: Autoría propia

2.7 Concentración inhibitoria 50 (IC_{50})

La concentración inhibitoria 50 (IC_{50}) se define como un parámetro cuantitativo empleado en estudios *in vitro* para determinar la cantidad de un compuesto inhibidor necesario para reducir en un 50% las actividades biológicas o bioquímicas de un componente biológico específico, como células, microorganismos, receptores o enzimas. Este valor constituye un indicador fundamental para evaluar la eficacia de agentes terapéuticos potenciales, y su determinación resulta esencial en el desarrollo y selección de compuestos con actividad farmacológica basándose en análisis de curvas dosis-respuesta (Dourson & Pournourmohammadi, 2014; Sánchez-Díez *et al.*, 2025). En el área de oncología, los ensayos de viabilidad celular constituyen una herramienta fundamental para el desarrollo de terapias eficaces, al permitir evaluar la respuesta de distintas líneas celulares de cáncer frente a tratamientos. En este contexto, el índice de concentración inhibitoria (IC_{50}) se ha empleado como referencia, permitiendo comparar la proliferación celular en presencia de compuestos específicos. Cuando se representa la evolución de la población celular o la magnitud proporcional, como la absorbancia en ensayo MTT, en función del tiempo, suele observarse un crecimiento de tipo exponencial. Esta relación se observa en una línea recta al graficarse en escala logarítmica, lo que permite aplicar modelos de regresión lineal para estimar la tasa de crecimiento celular. Una pendiente positiva indica un crecimiento en el número de células viables, mientras que una pendiente negativa refleja un crecimiento exponencial decreciente. Esta metodología permite evaluar de forma precisa el efecto de un agente con efecto anticancerígeno a través del análisis de las variaciones en la tasa de crecimiento celular (Sánchez-Díez *et al.*, 2025).

3. JUSTIFICACIÓN

El cáncer de mama constituye una de las principales causas de morbilidad y mortalidad en mujeres a nivel mundial, representando un grave problema de salud pública que exige la búsqueda constante de alternativas terapéuticas más efectivas, seguras y accesibles. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), este tipo de cáncer ocupa el primer lugar en incidencia entre las mujeres y se asocia con una elevada tasa de mortalidad, especialmente en países en vías de desarrollo, donde los tratamientos son limitados. Los tratamientos convencionales, como la quimioterapia, radioterapia, hormonoterapia, si bien han demostrado eficacia en la reducción del crecimiento tumoral, suele estar acompañados de efectos secundarios severos, elevado toxicidad sistémica y en algunos casos, resistencia celular, lo que impulsa la necesidad de explorar nuevas estrategias terapéuticas complementarias o alternativas. La investigación sobre compuestos bioactivos de origen natural ha cobrado relevancia debido a su potencia terapéutico, entre ellos, los β -glucanos, polisacáridos presentes en la cebada (*Hordeum vulgare*) y la avena (*Avena sativa*), que han demostrado poseer diversas propiedades biológicas, incluyendo efectos inmunomoduladores, antioxidantes y particularmente, actividad anticancerígena, evidenciada en diferentes tipos de cáncer bajo condiciones *in vitro*. No obstante, a pesar de los avances, la evidencia científica sobre la actividad antitumoral específica de los β -glucanos frente a células de cáncer de mama, particularmente en líneas celulares de tipo triple negativo como MDA-MB-231 (caracterizadas por su alta agresividad, capacidad metastásica y resistencia a terapias), aún es limitada y requiere mayor exploración experimental. Asimismo, la optimización de métodos de extracción representa un aspecto fundamental para maximizar la pureza, la integridad estructural y la bioactividad de estos compuestos.

Por lo tanto, el presente trabajo se justifica en la necesidad de profundizar en la evaluación del potencial anticancerígeno de los β -glucanos extraídos de cebada y avena mediante ultrasonido, aplicados sobre la línea celular MDA-MB-231, con el propósito de aportar evidencia científica que atribuya a la comprensión de sus mecanismos de acción y a la eventual incorporación de estos compuestos como agentes alternativos contra el cáncer de mama.

4. HIPÓTESIS

Los β -glucanos de cebada (*Hordeum vulgare*) y avena (*Avena sativa*), extraídos mediante ultrasonido, presentan efecto anticancerígeno, evidenciada por una inhibición significativa de la viabilidad de la línea celular de cáncer de mama MDA-MB-231 en un estudio *in vitro*.

5. OBJETIVOS

5.1 Objetivo general

Comparar el efecto anticancerígeno de β -glucanos extraídos de cebada (*Hordeum vulgare*) y avena (*Avena sativa*) aplicados a células de cáncer de mama MDA-MB-231 mediante un estudio *in vitro*.

5.2 Objetivos específicos

- Realizar el análisis químico proximal del grano de cebada (*Hordeum vulgare*) y avena (*Avena sativa*) para determinar la composición de cada materia prima.
- Extraer los β -glucanos por medio de baño ultrasónico en tiempos de 10, 20 y 30 min, y obtener su rendimiento.
- Cuantificar el contenido de β -glucanos para determinar el porcentaje de pureza de las extracciones mediante el kit de análisis de β -glucano “Megazyme”.
- Determinar la actividad inhibitoria de los β -glucanos en las células de cáncer de mama en la línea celular MDA-MB-231 mediante un estudio *in vitro* utilizando el ensayo MTT para comparar el efecto anticancerígeno.

6. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1 Obtención de la materia prima

Para el desarrollo de este proyecto se utilizó grano de cebada (*Hordeum vulgare*) adquirido de la empacadora “Mi granero”, ubicada en San Pedro Cholula, Puebla con número de lote 190723 y el grano de avena (*Avena sativa*) fue adquirido de manera comercial en el municipio de Cuautepec de Hinojosa, Hidalgo.

6.2 Análisis químico proximal de los granos de cebada y avena

Para el análisis químico proximal de los cereales se aplicó la metodología establecida por la Association of Official Analytical Chemists (AOAC, 2015), en el que se determinó humedad, cenizas, grasa, fibra y proteína, y cada uno se realizó por triplicado.

6.2.1 Determinación de humedad

Para la determinación de humedad se aplicó el método 934.01 (AOAC, 2015). En una charola de aluminio se pesaron 10 g de muestra utilizando una balanza analítica (Ohaus, AX423, E.U.A.) y se colocaron en un horno de secado (Terlab, TE-FH45DM, México) a 110°C durante 4 h, hasta alcanzar un peso constante. Posteriormente, las muestras se enfriaron en un desecador durante 15 min y se registró su peso final en la balanza analítica (Ohaus, AX423, E.U.A.). El porcentaje de humedad se calculó mediante la Ecuación 1.

$$\% \text{ humedad} = \frac{M_h - M_s}{M} \times 100 \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

M_h = Peso de la charola de aluminio más muestra húmeda

M_s = Peso de la charola de aluminio más muestra seca

M = Peso de la muestra

6.2.2 Determinación de cenizas

Para la determinación de cenizas se aplicó el método 942.05 (AOAC, 2015). En un crisol de porcelana a peso constante se pesaron 5 g de muestra, mediante una balanza analítica (Ohaus, AX423, E.U.A.), y se sometieron a fuego directo hasta carbonizarla y posteriormente se calcinó en una mufla (Felisa,

FE-361, México) a 550°C durante 4 h, al término de este tiempo se colocó en un desecador para su enfriamiento y se registró el peso final en la balanza analítica (Ohaus, AX423, E.U.A.). Se calculó el porcentaje de cenizas utilizando la Ecuación 2.

$$\% \text{ cenizas} = \frac{P_c - P_s}{P} \times 100 \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

P_c = Peso del crisol con muestra calcinada

P_s = Peso del crisol sin muestra

P = Peso de la muestra

6.2.3 Determinación de grasa

Para la determinación de grasa se aplicó el método 920.39 (AOAC, 2015). Se agregó la muestra resultante de la determinación de humedad en un cartucho de celulosa, como solvente orgánico se agregaron 50 mL de éter de petróleo y se colocó en un extractor Soxhlet (Büchi, E816-HE, Suiza). El proceso se realizó durante 4 h, al término del tiempo se colocó el vaso en un desecador durante 30 min hasta disminuir la temperatura y se registró su peso utilizando la balanza analítica (Ohaus, AX423, E.U.A.). El porcentaje de grasa se calculó utilizando la Ecuación 3.

$$\% \text{ grasa} = \frac{V_g - V_s}{V} \times 100 \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

V_g = Peso del vaso con grasa

V_s = Peso del vaso solo

V = Peso de la muestra

6.2.4 Determinación de fibra cruda

Para la determinación de fibra cruda se aplicó el método 962.09 (AOAC, 2015). La muestra que resultó de la determinación de grasa se agregó en un vaso Berzelius, en el que se añadieron 200 mL de H_2SO_4 al 0.255 N y se colocaron en un determinador de fibra (Labconco, LAC300001-00, E.U.A.) en el que hirvió durante 30 min. Posteriormente se filtró, se añadió agua destilada para alcanzar un pH neutro para volver a hervir por 30 min con 200 mL de NaOH al 0.313 N, nuevamente se filtró y

se lavó con 25 mL de H₂SO₄ al 0.255 N, 150 mL de agua destilada y 25 mL de alcohol al 70°. El residuo de la filtración fue colocado en un crisol y se sometió a secado en una estufa a 110°C durante 2 h, transcurrido este tiempo se calcinó en una mufla a 550°C durante 30 min, al terminar se registró el peso en la balanza analítica (Ohaus, AX423, E.U.A.). Se calculó el porcentaje de fibra utilizando la Ecuación 4.

$$\% \text{ fibra cruda} = \frac{C_s - C_c}{C} \times 100 \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde:

C_s = Peso del crisol con muestra seca

C_c = Peso del crisol con muestra calcinada

C = Peso de la muestra

6.2.5 Determinación de proteína cruda

Para la determinación de proteína cruda se aplicó el método 2001.11 (AOAC, 2015). Esta determinación se llevó a cabo en dos etapas, la digestión y la destilación. En un tubo Kjeldahl se agregaron 0.5 g de muestra, una pastilla digestora y 15 mL de H₂SO₄ a 96% de pureza y se posicionó en el digestor (Büchi, K-425/K/436, Suiza), hasta que la muestra adquiera un color marrón. Posteriormente, para la segunda fase, se añadieron 20 mL de agua destilada y se ubicó en un destilador (Büchi, K-355, Suiza), en el tubo terminal del equipo se colocó un matraz Erlenmeyer con 50 mL de H₃BO₃ 2% y como indicador 3 gotas de rojo de metilo. Finalmente, la sustancia resultante del matraz se procedió a titular con H₂SO₄ al 0.1 N. Se calculó el porcentaje de proteína utilizando la Ecuación 5 y 6.

$$\% \text{ Nitrógeno} = \frac{(M)(N)(H)}{P} \times 100 \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde:

M = mL gastados de H₂SO₄ al 0.1 N

N = meq del Nitrógeno

H = Normalidad del H₂SO₄

P = Peso de la muestra

$$\% \text{ proteína} = (\% \text{ Nitrógeno})(\text{Factor de conversión})$$

(Ecuación 6)

Donde:

Factor de conversión para cebada y avena = 5.83

6.3 Extracción de β -glucanos de los granos de cebada y avena

La extracción de β -glucanos se realizó mediante la metodología de Morales *et al.*, (2019) y Cao *et al.*, (2024) con modificaciones y se basa en tres fases generales, el pretratamiento, la extracción y la purificación.

6.3.1 Pretratamiento del grano

Los granos de cebada y avena fueron sometidos a un proceso de molienda utilizando un procesador de alimentos (Nutri Bullet, NB-201, E.U.A.) hasta obtener un polvo fino. Posteriormente, el material molido fue tamizado empleando una malla número 80, con el objetivo de homogenizar el tamaño de partícula. El polvo resultante se suspendió en una solución de etanol al 80% (v/v), utilizando una relación soluto solvente de 1:4. La mezcla se mantuvo a 70°C durante 2 h bajo agitación constante a 200 rpm en una parrilla con agitación (Thermo scientific, SP131325Q, E.U.A.). Este tratamiento tuvo como finalidad remover componentes no deseados, tales como proteínas, grasas y pigmentos, como se observa en el Figura 18. Una vez finalizado el proceso, la suspensión fue sometida a filtración, recuperando el soluto, el cual se secó a 50°C en un horno de secado (Terlab, T-H-45DM, México) durante 12 h. Finalmente, el material seco fue remolido en el procesador de alimentos (Nutri Bullet, NB-201, E.U.A.) para obtener nuevamente un polvo homogéneo.



Figura 18. Precipitación del polvo de cebada después del pretratamiento con etanol, observando el sobrenadante con pigmentos, grasa y proteínas. Fuente: Autoría propia

6.3.2 Extracción de β -glucanos

Para la extracción de los β -glucanos se utilizó un baño ultrasónico (Cole-Parmer, 08895-09, E.U.A.), a una temperatura $30 \pm 1^\circ\text{C}$, como variables la relación soluto-solvente de 1:10, en el cual se utilizó como solvente agua destilada, y el tiempo de 10, 20 y 30 min, como se observa en la Figura 19.



Figura 19. Extracción de β -glucanos por baño ultrasónico. Fuente: Autoría propia

6.3.3 Purificación de los β -glucanos

Los concentrados obtenidos fueron sometidos a centrifugación a 5,000 rpm y 4°C durante 20 min, empleando una centrífuga con refrigeración (Sorvall, RC-5C+, E.U.A.), con el propósito de eliminar el precipitado y conservar el sobrenadante. Posteriormente, el pH de la solución se ajustó a 10.0 mediante la adición de Na_2CO_3 al 20% (p/v), utilizando un potenciómetro (Hanna instruments, HI2210-01, Italia). La mezcla se mantuvo bajo agitación constante de 200 rpm a 50°C durante 1 h en una parrilla de agitación y calentamiento (Cole-Parmer, 03407-31, E.U.A.). Durante este tratamiento alcalino, se produjo una alteración estructural del almidón, favoreciendo su eliminación mediante la centrífuga (Sorvall, RC-5C+, E.U.A.) bajo las mismas condiciones de velocidad y temperatura (5,000 rpm y 4°C durante 20 min). Una vez separadas las fracciones insolubles, el pH de la solución se redujo a 4.5 mediante la adición de HCl al 2 M, con el fin de desnaturalar las proteínas presentes. Estas proteínas fueron separadas por la centrifugación bajo las mismas condiciones previamente descritas en una centrífuga (Sorvall, RC-5C+, E.U.A.). El sobrenadante resultante se enfrió a 5°C utilizando un refrigerador (Mabe, G11GX, México), y se le adicionó etanol al 90°C (v/v) en una relación 3:1, manteniendo la mezcla a 5°C durante 12 h para favorecer la precipitación de β -glucanos, como se observa en la Figura 20. Finalmente, la mezcla fue centrifugada a 5,000 rpm y 4°C durante 20 min en una centrífuga con refrigeración (Sorvall, RC-5C+, E.U.A.), para separar el precipitado. El sobrenadante fue descartado y el precipitado recuperado se secó a 40°C durante 3 h en un horno de secado (Terlab, T-H-45DM, México). Posteriormente se molvió con un micro molino manual (Glas-Col, 099C E2000, E.U.A.) hasta que se obtuvo un polvo fino, como se observa en la Figura 21.



Figura 20. Precipitación de β -glucanos con etanol. Fuente: Autoría propia



Figura 21: β -glucano de avena seco y molido. Fuente: Autoría propia

6.4 Rendimiento de extracción y cuantificación de β -glucanos de cebada y avena

Los rendimientos de extracción de β -glucanos se calcularon con la Ecuación 7:

$$\text{Rendimiento de extracción (\%)} = \frac{M_b}{M_p} \times 100 \quad (\text{Ecuación 7})$$

Donde:

M_b = Masa del β -glucano obtenido (g)

M_p = Masa del polvo de cebada o avena (g)

Mientras que para la cuantificación se utilizó un kit de ensayo β -D-glucano de enlace mixto de la marca Megazyme International, con base a los métodos de AACC 32-23.01 y AOAC 995.16, como se muestra en la Figura 22. El fundamento del método se muestra en la Figura 23, basándose en la hidrólisis específica del β -glucano de enlace mixto por acción de la enzima liquenasa, la cual actúa sobre los puntos de ruptura señalados en la estructura del polisacárido, generando β -gluco-oligosacáridos. Posteriormente, estos son sometidos a una segunda hidrólisis catalizada por la β -glucosidasa, dando como producto final D-glucosa. La cuantificación de la D-glucosa liberada se realiza mediante una reacción enzimática acoplada utilizando el reactivo glucosa oxidasa/peroxidasa (GODOP), el cual permite medir espectrofotométricamente la concentración de glucosa producida. Dado que la cantidad de D-glucosa generada es estequiométricamente equivalente al contenido de β -glucano presente en la muestra 23 (Megazyme, 2025).



Figura 22. Kit de ensayo de enlace mixto "Megazyme" para cuantificación de β -glucanos de cebada y avena. Fuente: Autoría propia

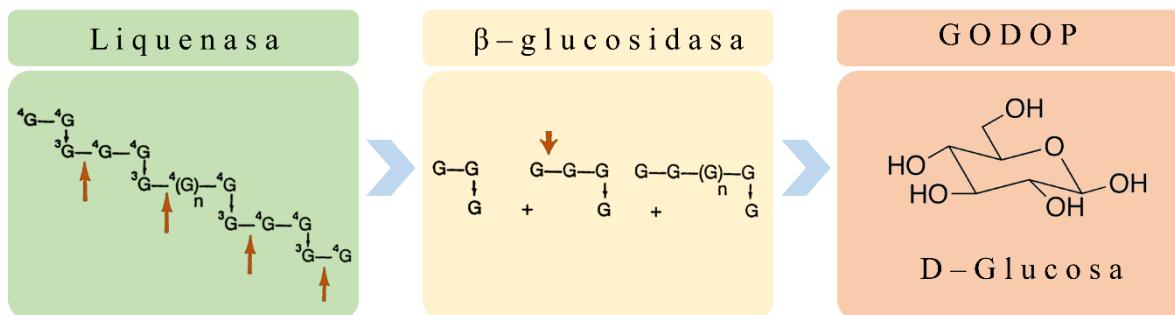


Figura 23: Fundamento del proceso del kit de ensayo de enlace mixto "Megazyme". Fuente: Autoría propia

En primer lugar, se pesaron 50 mg del polvo de la extracción obtenida en tubos de 17 mL de capacidad, los cuales fueron pesados en una balanza analítica (Santorius, ED224S, Alemania) procurando que el material quedara depositado completamente en el fondo. Las muestras se humedecieron con 0.2 mL de etanol acuoso al 50% (v/v) con el fin de favorecer su dispersión

homogénea. Seguidamente, se adicionaron 4.0 mL de una solución tampón de fosfato de sodio al mM y pH 6.5. El contenido fue mezclado cuidadosamente en un vórtex (Scientific industries, G560, E.U.A.). Una vez complementada esta etapa, los tubos se colocaron en baño María a ebullición en un baño María de recirculación (Thermo scientific, 2864, E.U.A.), donde permanecieron durante 1 min. Posteriormente, se agitó nuevamente con el vórtex y se continuó la incubación a 100°C durante 2 min adicionales, seguida de una agitación para garantizar la completa dispersión del material. Concluido este proceso, las muestras se incubaron a 50°C durante 5 min con el objetivo de equilibrar la temperatura del sistema antes de la adición de la enzima. A continuación, se incorporaron 0.2 mL de una solución enzimática de liquenasa diluida, mezclándose nuevamente en el vórtex. Los tubos fueron sellados con Parafilm y mantenidos a 50°C durante 1 h, con agitación intermitente cada 15 a 20 min para asegurar un contacto adecuado entre la enzima y el sustrato. Posteriormente, se añadieron 100.0 mL de tampón de acetato de sodio a 200 mM y pH 4.0, y se mezclaron vigorosamente. Las muestras se dejaron equilibrar a temperatura ambiente durante 5 min y se centrifugaron a 1000 g por 10 min en una centrífuga (Sorvall, RC-5C+, E.U.A.). Del sobrenadante obtenido, se dispensaron cuidadosamente alícuotas de 0.1 mL en el fondo de 3 tubos de ensayo con capacidad de 12 mL. A dos de los tubos se le agregó 0.1 mL de una solución diluida de β -glucosidasa, mientras que el tercero (considerado como blanco de reacción) se le adicionó 0.1 mL de tampón de acetato a 50 mM y pH 4.0. Todos los tubos fueron incubados a 50°C durante 10 min. Finalizando el periodo de incubación, se añadieron 3.0 mL de reactivo GODOP a cada tubo y se mantuvieron nuevamente a 50° durante 20 min adicionales. Finalmente, los tubos fueron retirados del baño María y se midió la absorbancia de cada muestra a una longitud de onda de 510 nm en un espectrofotómetro (Shimadzu, UV-1280, Japón), utilizando como referencia el blanco de reactivo. Se calculó el porcentaje de β -glucanos utilizando la Ecuación 8.

$$\beta - \text{glucano} \left(\% \frac{p}{p} \right) = \Delta A \times \frac{F}{W} \times 0.9 \quad (\text{Ecuación 8})$$

Donde:

ΔA = Absorbancia después de la reacción con la β -glucosidasa menos el blanco de reacción

F = Factor de conversión de los valores de absorbancia a μg de glucosa

W = Peso de la muestra (mg)

0.9 = Factor para convertir D-glucosa libre a D-glucosa anhidro (como sucede con el β -glucano)

6.5 Efecto anticancerígeno de los β -glucanos en la línea celular MDA-MB-231

6.5.1 Preparación de medio de cultivo Leibovitz L-15

El medio Leibovitz L-15 (ATCC, E.U.A.) se utilizó como fuente de nutrientes para favorecer el crecimiento de las células, para su preparación se complementó con la adición del 10% de suero bovino fetal (Biowest, Francia) y el 1% de antibiótico (Sigma Aldrich, E.U.A.), posteriormente, se esterilizó por medio de filtración utilizando un filtro con una membrana de 0.22 micras de porosidad (Sigma Aldrich, E.U.A.), como se muestra en la Figura 24.



Figura 24. Esquema que muestra el proceso de esterilización por filtración del medio Leibovitz L-15. Fuente: Autoría propia

6.5.2 Cultivo celular

Las células de cáncer de mama, línea celular MDA-MB-231 fueron proporcionadas por el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE). Estas se incubaron en frascos para cultivo celular con 3 mL de medio Leibovitz L-15, manteniéndose a 37°C en una incubadora (Thermo Scientific, MIDI 40 I, E.U.A.). hasta alcanzar una confluencia del 80% aproximadamente. Para el conteo celular, se retiró el medio L-15 y se adicionó 500 μ L de tripsina (Gibco, E.U.A.) diluida a una relación 1:9, incubándose a 37°C durante 3 min para favorecer el desprendimiento de las células. Transcurrido el tiempo, se agregó 1 mL de medio para neutralizar la acción de la tripsina. La suspensión resultante se transfirió a un vial y se centrifugó en una microcentrifuga (Labnet International, C2400-T 24D, E.U.A.) a 1500 rpm durante 5 min. Posteriormente, se descartó el sobrenadante y se resuspendió el pellet celular en 1 mL de medio L-15 fresco. En un vial se tomó una alícuota de 10 μ L de la suspensión celular, se mezcló con 90 μ L de azul de tripano (Meyer, México) (solución al 0.4%) y se realizó el recuento en una cámara Neubauer (Isolab, Alemania). Cuando se tuvo la cantidad de células se utilizó la Ecuación 9:

$$\frac{\text{células}}{\text{mL}} = (P)(F_d) \left(\frac{1}{F_v}\right) (1000) \quad (\text{Ecuación 9})$$

Donde:

P = Promedio del número de células

F_d = Factor de dilución

F_v = Factor de volumen

Las células se sembraron en una placa de 96 pocillos, depositando 100 µL en cada pozo que contenía 20,000 células aproximadamente, y se incubaron bajo las mismas condiciones mencionadas anteriormente en una incubadora (Thermo Scientific, MIDI 40 I, E.U.A.) durante 24 h para permitir la proliferación de las células. El proceso se observa en la Figura 25.

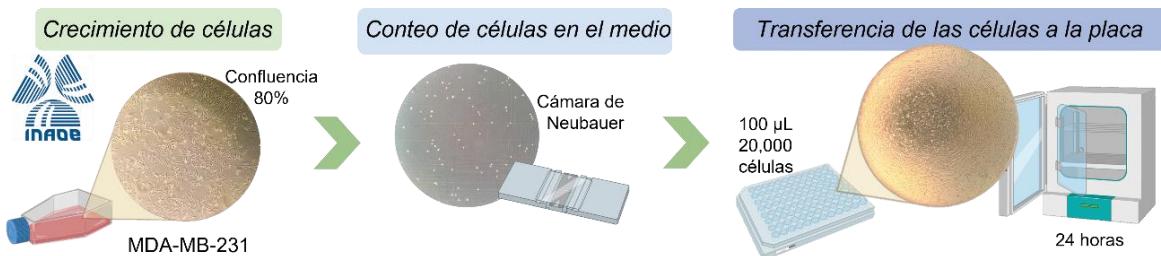


Figura 25. Proceso de crecimiento de la línea celular, conteo y sembrado a la placa de 96 pocillos. Fuente: Autoría propia

6.5.3 Preparación de tratamiento de β-glucanos

Transcurrido el periodo de incubación, el medio de cultivo de cada pozo fue retirado y sustituido por medio L-15 que contenía los diferentes tratamientos de β-glucanos. Se emplearon los extractos de β-glucanos a partir de grano de cebada y avena, así como un β-glucano comercial (marca Fluka con una pureza ≥95%), Los tratamientos se prepararon en concentraciones de 0 (Control), 125, 250 y 500 µg/mL de medio L-15. Posteriormente se adicionaron 100 µL de cada tratamiento a cada pozo de la placa, como se muestra en la Figura 26. Una vez diluidos los tratamientos, las células fueron incubadas nuevamente a 37°C durante 24 h en una incubadora (Thermo Scientific, MIDI 40 I, E.U.A.).

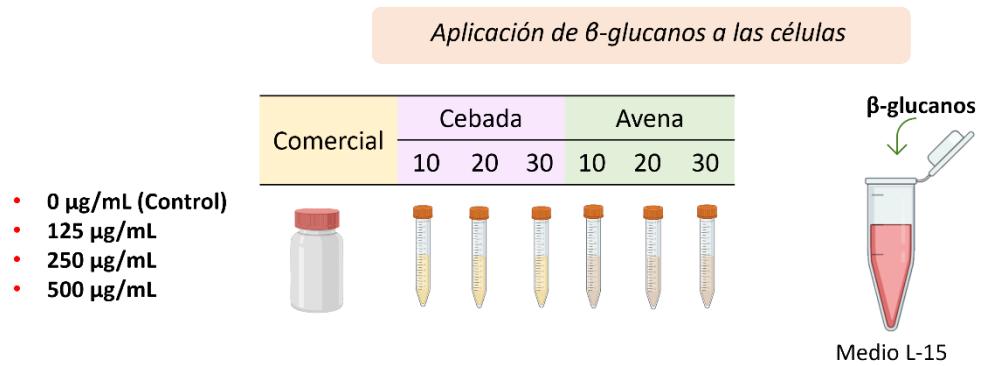


Figura 26. Tratamientos y dosis de β -glucanos aplicados en células MDA-MB-231. Fuente: Autoría propia

6.5.4 Viabilidad celular con ensayo MTT

La evaluación de la viabilidad celular se llevó a cabo mediante el ensayo MTT (Metil Tiazolil Tetrazolio) (Sigma Aldrich, E.U.A.), se basa en la conversión de tetrazolio, una sal de color amarillo, en formazan que se presentó de color morado, esto es realizado por las células viables. Se retiró el medio L-15 de cada pozo y se agregó 100 μL de MTT en cada uno y se incubó a 37°C durante 4 h en una incubadora (Thermo Scientific, MIDI 40 I, E.U.A.), transcurrido este tiempo, se agregó 100 μL de DMSO (Dimetil-sulfóxido) (Sigma Aldrich, E.U.A.) y se mantuvo en agitación en un agitador de microplacas (CScientific, CVP-9001, E.U.A.) durante 15 min para disolver los cristales de formazan, como se muestra en la Figura 27. Por lo tanto, el grado de coloración fue proporcional a la cantidad de células viables presentes en la muestra y la placa fue leída por un lector de absorción de microplacas (Bio-Rad, E.U.A.) a una longitud de onda de 570 nm (Garcia-Contreras *et al.*, 2019).

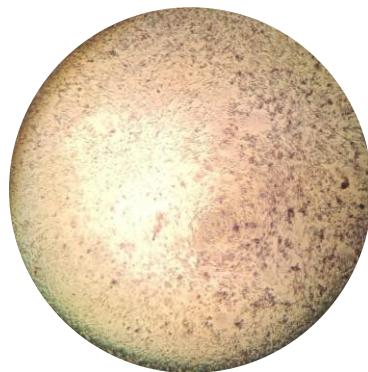


Figura 27. Cristales de formazan realizado por las células viables. Fuente: Autoría propia

6.6 Análisis estadístico

Los datos obtenidos en el rendimiento y la pureza de los β -glucanos de cebada y avena se evaluaron mediante un análisis de varianza (ANOVA) y la comparación de medias se aplicó una prueba Tukey. Mientras que la viabilidad de la línea celular MDA-MB-231 tras la adición de β -glucanos y las diferencias entre tratamientos y el control se determinaron mediante una prueba Duncan, con un nivel de significancia $p \leq 0.05$. El análisis estadístico se realizó con el programa estadístico SPSS versión 21, mientras que la representación gráfica de los resultados se elaboró con SigmaPlot versión 14.0.

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1 Químico proximal de los granos de cebada y avena

Los resultados del análisis químico proximal de los granos de cebada y avena se presentan en la Tabla 7. En la cebada se obtuvo un 9.47% de contenido de humedad, valor cercano al reportado por Castillo-Olvera *et al.*, (2012), quienes caracterizaron granos de cebada de la variedad Esmeralda cultivado en la zona del Altiplano de Hidalgo, con 9.83%. De acuerdo con la NMX-FF-043-SCFI-2003, (2003) ambos resultados se encuentran por debajo de lo establecido como humedad máxima entre 11.5 y 13.5%, es importante destacar que este componente representa un parámetro crítico, dado que un contenido de 14% es considerado el límite máximo, superar este valor puede favorecer el desarrollo de hongos filamentosos, los cuales deterioran tanto la estructura del grano como sus componentes intracelulares, que pueden alterar la obtención de β -glucanos, y a su vez son capaces de producir micotoxinas que dañan la salud humana y animal (Marrez & Ayesh, 2022). Mientras que con la avena se obtuvo una humedad de 11.50%, este dato fue comparado con Manolache *et al.*, (2013), quienes evaluaron seis variedades de avena y con los datos establecieron rangos de contenido para cada componente, en el caso de la humedad, reportaron valores entre 10.39 y 11.10%, por lo que el valor obtenido en el presente trabajo se encuentra ligeramente superior. Sin embargo, de acuerdo con Kouřimská *et al.*, (2018) quienes también caracterizaron seis variedades de avena, reportaron un contenido de humedad de 9.90% como valor mínimo y 12.5% como máximo, ubicándose el valor obtenido de la Tabla 7 dentro de este intervalo. No obstante, conforme a lo establecido por el Codex Alimentarius CXS 201- 1995, (2019), el contenido máximo de humedad permitido para la comercialización del grano es de 14% m/m, por lo que el resultado obtenido aún se encuentra dentro del límite normativo aceptado.

Respecto al contenido de fibra, la cebada presentó 13.34%, dato similar a lo que reportaron Castillo-Olvera *et al.*, (2012), quienes obtuvieron un 13.88%. Mientras que la avena fue de 5.21%, a pesar de que es un valor inferior a lo reportado con el grano anterior, el valor se encuentra por encima del rango de 1.9 a 4.36%, establecido por Manolache *et al.*, (2013). Cabe mencionar que este componente adquiere relevancia en el presente estudio, dado que los β -glucanos constituyen un tipo de fibra soluble que al contacto con el agua forma geles viscosos, y en el organismo se le atribuyen efectos beneficiosos como reducción de niveles de colesterol y glicemia, efecto cicatrizante, antioxidante y anticancerígeno, por mencionar algunos (Chiozzi *et al.*, 2021).

En cuanto al contenido de grasa, la cebada presentó 1.73%, valor coincidente con el reportado por Castillo-Olvera *et al.*, (2012). Este bajo porcentaje refleja su alto contenido nutricional, dando lugar a un bajo contenido de grasa, de los cuales predominan el ácido linoleico (56%), palmitico (23%),

oleico (13%) y linolénico (8%), almacenados en la aleurona y el embrión (Lukinac & Jukić, 2022). En contraste, la avena es considerada uno de los granos con mayor cantidad lipídica, alcanzando 4.61%, dato que se encuentra dentro del intervalo entre 4.46 y 6.70%, señalado por Manolache *et al.*, (2013). De acuerdo a su variedad, puede llegar a presentar hasta un 18%, siendo los principales ácidos el oleico, palmítico y linoleico (Kouřimská *et al.*, 2018). El contenido proteico en el grano de cebada fue de 9.75%, un dato inferior al reportado por Castillo-Olvera *et al.*, (2012), quienes registraron un 13.16%. Sin embargo, estos resultados se encuentran dentro de lo establecido para este grano, que puede llegar a poseer entre 7 a 25% determinado por el USDA (United States Department of Agriculture) en un estudio realizado con más de 10,000 genotipos de cebada (Swanson & Ellis, 2002). Entre las fracciones proteicas identificadas se encuentran las albuminas, las globulinas, las prolaminas y las gluteninas (Lukinac & Jukić, 2022). De igual manera que en el componente lipídico, la avena posee mayor contenido de proteína obteniendo un 16.58%, posicionándose dentro del rango de 14.31 a 21.31% reportado por Manolache *et al.*, (2013), asimismo, el valor obtenido se encuentra dentro del intervalo entre 13.9 y 18.4%, establecido por Kouřimská *et al.*, (2018).

El contenido de cenizas en la cebada fue de 1.68%, en contraste con lo reportado por Castillo-Olvera *et al.*, (2012) quienes obtuvieron un valor de 2.14%. Cabe señalar que este componente puede variar entre 2.0 y 3.0% (Lukinac & Jukić, 2022). La diferencia observada del presente trabajo que se encuentra fuera de dicho rango, puede atribuirse a la capacidad diferencial de absorción y acumulación de minerales de cada variedad, así como los factores genéticos y ambientales que influyen de manera determinante en la composición nutricional de los granos (Wotango & Kanido, 2024). Por otro lado, con el grano de avena se obtuvo 1.95%, ubicándose dentro de lo reportado por Manolache *et al.*, (2013) de 1.5 a 2.34%.

Tabla 7. Análisis químico proximal de granos de cebada y avena

Componente	Cebada (%)	Avena (%)
Humedad	9.47 ± 0.09	11.50 ± 0.15
Cenizas	1.68 ± 0.02	1.95 ± 0.04
Grasa	1.73 ± 0.02	4.61 ± 0.23
Fibra	13.34 ± 0.05	5.21 ± 0.18
Proteína	9.75 ± 0.08	16.58 ± 0.35
Carbohidratos	64.03	60.15

Los valores se presentan como promedios ± desviación estándar, n=3

7.2 Porcentaje de rendimiento y pureza de los β-glucanos de cebada y avena

Los porcentajes de rendimiento y pureza obtenidos en las extracciones de β-glucanos a partir de granos de cebada y avena se observan en la Tabla 8. En relación con el rendimiento, con las extracciones a partir de la cebada, se obtuvieron valores de 3.81% a los 10 min, 4.35% a los 20 min y 4.71% a los 30 min, observándose un incremento progresivo conforme aumentó el tiempo de extracción. No obstante, de acuerdo al análisis estadístico, se identificaron diferencias significativas únicamente en el primer intervalo (10 min) y el tercero (30 min). Al comparar estos resultados con los de Liu *et al.*, (2021), quienes emplearon granos de cebada sin cáscara para la extracción de β-glucanos, empleando ultrasonido con una amplitud del 50%, una relación soluto (polvo del grano)-solvente (agua) de 1:25 y un tiempo de 20 min, se observa que los autores reportaron un rendimiento de 1.45%, valor considerablemente inferior al obtenido en el presente trabajo. De acuerdo a lo señalado por (Fu *et al.*, 2019), diversas variables influyen de manera significativa en la eficiencia de extracción de β-glucanos, entre ellas la amplitud del ultrasonido, el tiempo de extracción y la proporción de materia seca del cereal respecto al volumen del disolvente. Dado que en ambos estudios se mantuvieron constantes con el tiempo y la relación soluto-solvente, la diferencia en los rendimientos puede atribuirse principalmente a la amplitud utilizada en el equipo. En cuanto al rendimiento de los β-glucanos de avena, se obtuvieron valores de 2.84% a los 10 min, 3.21% a los 20 min y 3.75% a los 30 min. Estos resultados fueron inferiores a los observados en la cebada lo cual puede atribuirse a la diferencia en el contenido natural de β-glucanos entre ambos cereales, en la cebada puede variar entre 5 y 11%, mientras que en la avena oscila entre 4.5 y 5.5% (Bobade *et al.*, 2021). Al igual que en el caso de la cebada, se observó un incremento en el rendimiento conforme aumentó el tiempo de extracción, aunque solo se identificaron diferencias estadísticamente significativas entre los tiempos de 10 y 30 min. Al comparar estos resultados con los reportados por Bieniek & Buksa, (2024), quienes llevaron a cabo la extracción de β-glucanos de avena mediante tres métodos consecutivos y en cada uno analizaron su rendimiento, la primera extracción con agua a temperatura ambiente, el cual no se reportó el porcentaje obtenido, en la segunda, fue mediante el método de hidrólisis enzimática con liquenasa, en el cual obtuvieron 1.65% y en la tercera extracción con agua caliente a 95°C, reportaron 0.33%. Por lo que, ambos valores son inferiores a los alcanzados mediante el método de ultrasonido en el presente trabajo, lo cual resalta la eficiencia de esta técnica.

Por otro lado, en cuanto al porcentaje de pureza de β-glucanos de cebada, se obtuvieron valores de 75.82%, 81.39% y 62.58%, para los tiempos de extracción de 10, 20 y 30 min, respectivamente, encontrando diferencias significativas entre los tres tratamientos evaluados. El incremento observado a los 20 min en comparación con los 10 min puede atribuirse al efecto de cavitación inducido por el ultrasonido, ya que una mayor duración del tratamiento incrementa la energía transmitida,

provocando una disrupción más intensa de las paredes celulares en las capas de la aleurona y el endospermo, donde se localizan los β -glucanos, lo que facilita su liberación en el medio solvente. No obstante, a los 30 min se observa una disminución en la pureza, lo cual coincide con lo señalado por (Hematian-Sourki *et al.*, 2017), quienes reportan que tiempos prolongados de sonicación favorecen a la liberación de otros compuestos intracelulares (minerales y almidón), que afectan considerablemente a la pureza del extracto. Al comparar estos resultados con los de Liu *et al.*, (2021), quienes obtuvieron una pureza del 84.91% en un tiempo de extracción de 20 min, se observa que dicho valor se encuentra ligeramente superior al obtenido en el presente estudio bajo condiciones similares (81.39%). Esta diferencia podría atribuirse al proceso de purificación aplicado por dichos autores, quienes incluyeron una etapa adicional con enzimas específicas como la α -amilasa y la tripsina, las cuales hidrolizan enlaces de almidón y proteínas, respectivamente, lo que favorece la eliminación de impurezas y así mejorando la pureza final del extracto. En el caso de la avena, los porcentajes de pureza obtenidos fueron de 80.74%, 83.16% y 66.20% para los tiempos de 10, 20 y 30 min, respectivamente. Se observaron diferencias significativas a los 30 min, donde se presentó una disminución en la pureza atribuida, al igual que en la cebada, a la liberación de compuestos intracelulares por efecto de una exposición prolongada al ultrasonido. Al contrastar con lo reportado por Bieniek & Buksa, (2024), quienes obtuvieron porcentajes de pureza de 73.3%, 72.3% y 75.8% en cada una de sus etapas de extracción, los valores obtenidos y mostrados en la Tabla 8 fueron superiores en los tiempos de 10 y 20 min. Esta diferencia puede atribuirse al uso del ultrasonido como método de extracción, el cual ha demostrado mayor eficiencia y selectividad en la obtención de β -glucanos (Alzorqi *et al.*, 2017; Liu *et al.*, 2021).

Tabla 8. Porcentaje del rendimiento y pureza de las extracciones de β -glucanos de cebada y avena

	Tiempo (min)			
	10	20	30	
Cebada	Rendimiento	3.81% \pm 0.21 ^a	4.35% \pm 0.09 ^{ab}	4.71% \pm 0.36 ^b
	Pureza	75.82% \pm 1.82 ^b	81.39% \pm 2.05 ^c	62.58% \pm 1.45 ^a
Avena	Rendimiento	2.84% \pm 0.43 ^a	3.21% \pm 0.18 ^{ab}	3.75% \pm 0.27 ^b
	Pureza	80.74% \pm 1.84 ^b	83.16% \pm 0.73 ^b	66.20% \pm 1.29 ^a

Los valores se presentan como promedios \pm desviación estándar, n=3. Letras distintas dentro de la misma fila indica diferencias significativas ($p\leq 0.05$)

7.3 Viabilidad de las células MDA-MB-231 con los β -glucanos de cebada y avena

El efecto de los extractos de β -glucanos de cebada, extraídos a diferentes tiempos (10, 20 y 30 min), sobre la viabilidad de la línea celular MDA-MB-231 a distintas concentraciones (125, 250 y 500 $\mu\text{g/mL}$), y las diferencias significativas entre los tratamientos y el control son representadas mediante letras (a-e) en la parte superior de las barras, como se muestra en la Figura 28. En el que el control presentó diferencias estadísticamente significativas a todos los tratamientos ($p \leq 0.05$). A una concentración de 125 $\mu\text{g/mL}$, los extractos presentaron una reducción moderada en la viabilidad, aunque con diferencias en función del tiempo de extracción, es decir, los β -glucanos extraídos durante 20 min mostraron el efecto más marcado, mientras que los de 30 min mantuvieron valores más cercanos al control. En la concentración de 250 $\mu\text{g/mL}$ se observó una disminución significativa en comparación con el control, pero sin diferencias notorias entre algunos tratamientos. Por otro lado, la concentración 500 $\mu\text{g/mL}$ resaltó el mayor efecto anticancerígeno, particularmente en el extracto de 20 min que presentó una viabilidad de 74.59% después de 24 h, siendo estadísticamente diferente del resto de los tratamientos. Resaltando que la eficiencia biológica de los β -glucanos no solo depende de la dosis, sino también del proceso de extracción y destacando la importancia de optimizar las condiciones para potenciar su efecto. Al comparar estos resultados con lo reportado por Lin *et al.*, (2018) quienes aplicaron β -glucanos de cebada a células de cáncer de colon (HCT-116) y de pulmón (A549), en donde obtuvieron una viabilidad del 90 y 82%, respectivamente, a la misma dosis de 500 $\mu\text{g/mL}$, se observó que la viabilidad obtenida en el presente estudio fue inferior (74.59%), lo que sugiere un mayor efecto citotóxico sobre la línea celular MDA-MB-231. Esta diferencia puede atribuirse a que esta línea celular de cáncer de mama triple negativa posee sensibilidad intrínseca, la cual presenta un fenotipo altamente glucolítico y un metabolismo dependiente de la glucólisis, con baja capacidad de fosforilación oxidativa (OxPhos), en comparación con otras líneas celulares. Este perfil muestra un elevado flujo glucolítico y una menor plasticidad bioenergética, lo que hace más vulnerable a la desregulación del estado redox y a la interrupción de rutas de supervivencia celular (Lanning *et al.*, 2017).

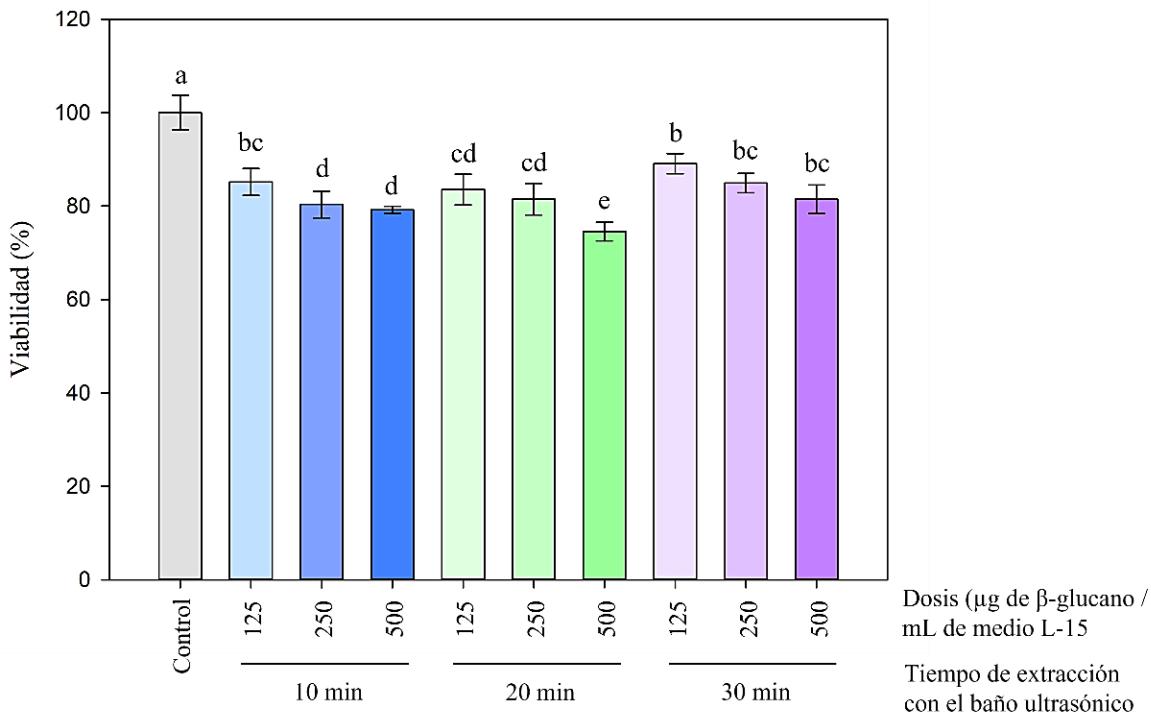


Figura 28: Viabilidad celular de MDA-MB-231 con extracciones de β -glucanos de cebada después de 24 h, n=4. Las barras de error representan desviación estándar, y las diferencias estadísticamente significativas ($p \leq 0.05$) entre el control y los tratamientos se indican con diferentes letras (a-e). Fuente: Autoría propia

El efecto de β -glucano comercial y de los extractos obtenidos de cebada sobre la viabilidad de la línea celular MDA-MB-231, como se observa en la Figura 29. El control presentó diferencias significativas ($p \leq 0.05$) con todos los tratamientos evaluados. El β -glucano comercial mostró el mayor efecto citotóxico, con una reducción uniforme y consistente de la viabilidad en todas las concentraciones evaluadas (125, 250 y 500 $\mu\text{g}/\text{mL}$), mostrando además una clara tendencia dosis-respuesta. A medida que la concentración aumentó, la viabilidad celular disminuyó progresivamente, alcanzando un valor mínimo de 70.84% a 500 $\mu\text{g}/\text{mL}$. Este efecto puede atribuirse a la elevada pureza del β -glucano comercial ($\geq 95\%$), ya que la pureza de los polisacáridos constituye un factor crítico en su actividad biológica. En este sentido, los β -glucanos altamente purificados presentan una mayor capacidad antitumoral, debido a la menor interferencia de compuestos secundarios y a una interacción más específica con receptores celulares (Geller *et al.*, 2019). Entre los extractos naturales, el β -glucano de cebada obtenido a 20 min y aplicado a 500 $\mu\text{g}/\text{mL}$ mostró la mayor reducción de viabilidad (74.59%), se posicionó como el tratamiento más efectivo después del tratamiento comercial, y a pesar de presentar diferencias significativas con respecto al tratamiento con β -glucano comercial, alcanzó

un efecto comparable, lo que resalta su potencial como fuente natural de compuestos bioactivos con actividad anticancerígena.

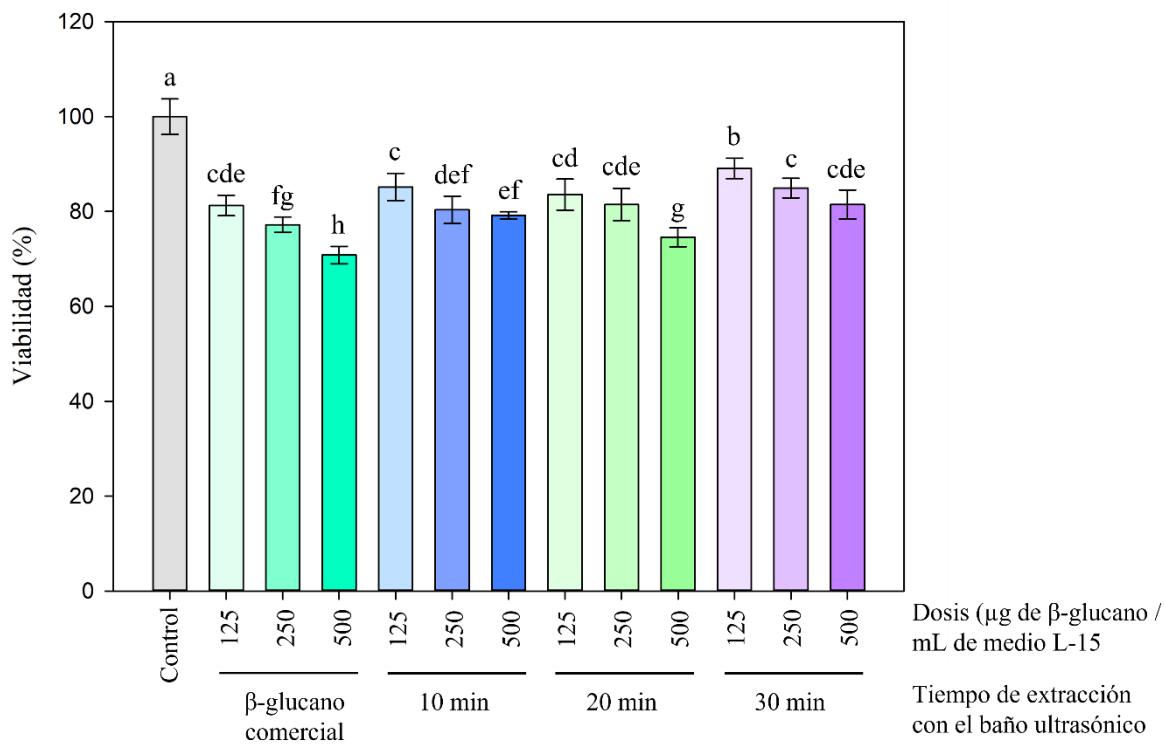


Figura 29: Viabilidad celular de MDA-MB-231 con extracciones de β -glucanos de cebada y β -glucano comercial después de 24 h, n=4. Las barras de error representan desviación estándar, y las diferencias estadísticamente significativas ($p \leq 0.05$) entre el control y los tratamientos se indican con diferentes letras (a-h). Fuente: Autoría propia

Los efectos de los tratamientos con β -glucanos de avena sobre la línea celular MDA-MB-231 se presentan en la Figura 30. Los resultados mostraron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) en comparación con el control. Entre los tratamientos, aunque las tres concentraciones generaron un impacto en la viabilidad celular, las diferencias más destacadas se establecieron entre los extractos a 500 $\mu\text{g}/\text{mL}$ y los de menor concentración 125 $\mu\text{g}/\text{mL}$, por lo que se observa relación dosis-respuesta en la actividad de los β -glucanos. La disminución más destacada de los β -glucanos de avena se presentó en la dosis de 500 $\mu\text{g}/\text{mL}$ a un tiempo de extracción de 20 min, la viabilidad descendió hasta 72.74%, un valor menor comparado con el obtenido con los β -glucanos de la cebada (74.59%), mostrando mayor efecto citotóxico, lo cual no solo está determinado por la concentración, sino también por la fuente que atribuyen a la bioactividad diferencial de los β -glucanos a la proporción de

enlaces β -(1,3) y β -(1,4), y su conformación de las cadenas polisacáridas, las cuales determinan su interacción con receptores celulares asociados a vías de apoptosis (Li *et al.*, 2021).

Estos datos se compararon con los de Parzonko *et al.*, (2015), quienes utilizaron β -glucanos provenientes de la misma fuente aplicados en células de melanoma (HTB-140) a una concentración de 200 $\mu\text{g}/\text{mL}$, reportando una viabilidad del 55%. Por su parte, Choromanska *et al.*, (2018) aplicaron β -glucanos en células de cáncer de pulmón (H69AR) a la misma concentración, obteniendo una viabilidad del 69%. De manera similar Climova *et al.*, (2021) evaluaron β -glucanos en células de cáncer de colon (HCT-116) con una dosis de 0.88 $\mu\text{g}/\text{mL}$, reportando una viabilidad del 76%. Aunque los datos obtenidos en este estudio reflejan una viabilidad superior a algunos estudios previos, es importante considerar que la línea celular MD-MB-231 pertenece al subtipo de cáncer de mama triple negativo. Este tipo de cáncer se caracteriza por su agresividad y ser invasivo, además de carecer de receptores de estrógeno, progesterona y de la proteína HER2. Esta ausencia podría interferir con las funciones fisiológicas de los β -glucanos (Palmero-Picazo *et al.*, 2021).

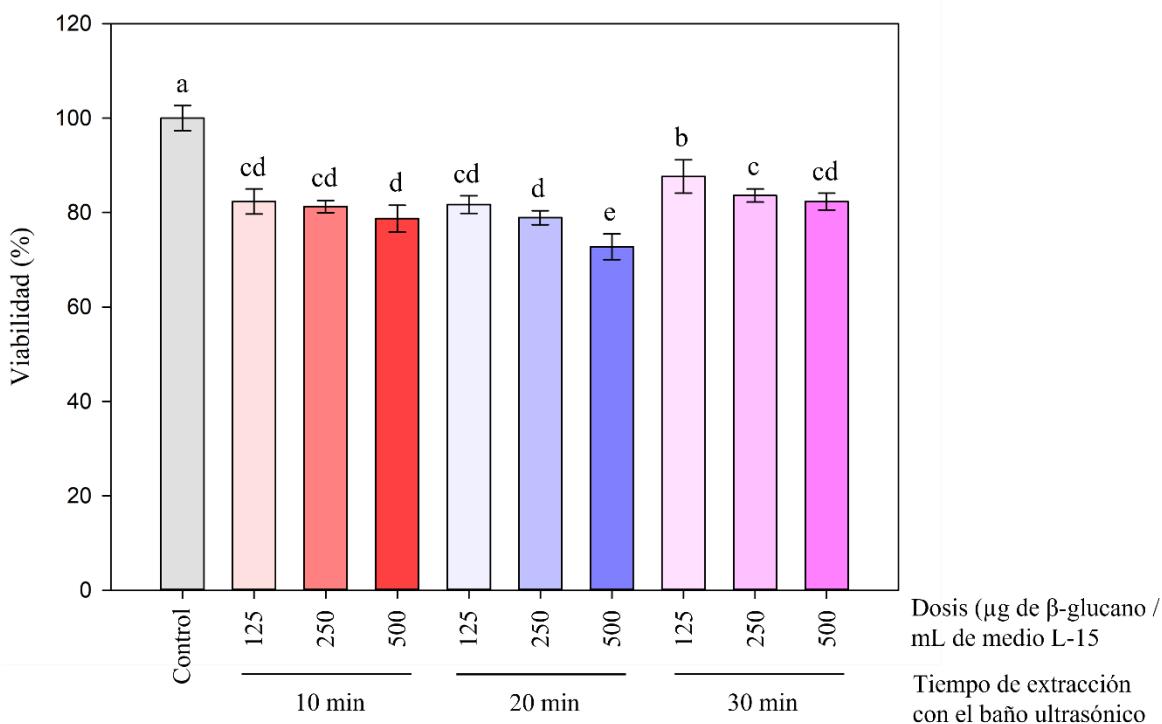


Figura 30: Viabilidad celular de MDA-MB-231 con extracciones de β -glucanos de avena después de 24 h, n=4. Las barras de error representan desviación estándar, y las diferencias estadísticamente significativas ($p \leq 0.05$) entre el control y los tratamientos se indican con diferentes letras (a-e). Fuente: Autoría propia

Comparando el β -glucano comercial y los β -glucanos extraídos de avena, se observaron diferencias significativas respecto al control, como se observa en la Figura 31. Todos los tratamientos mostraron diferencias significativas de la viabilidad con respecto al control. Cabe destacar que, aunque el efecto de los β -glucanos de avena fue menos pronunciado y mostró más variabilidad, no se observaron diferencias significativas entre el β -glucano comercial a 500 $\mu\text{g/mL}$ (70.84%), y el extracto de avena obtenido a los 20 min y aplicados a la misma dosis (72.74%). Estos resultados sugieren que, bajo condiciones de extracciones optimizadas, los β -glucanos extraídos de origen natural resalta el potencial como alternativa para aplicaciones biomédicas.

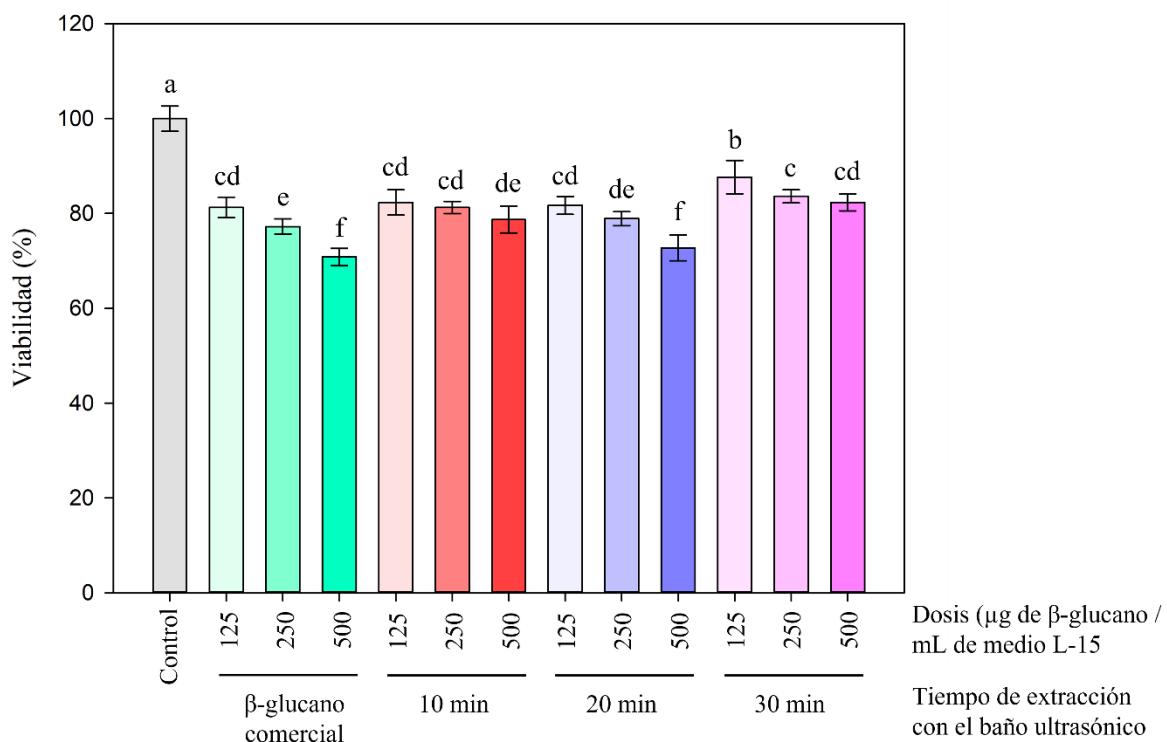


Figura 31: Viabilidad celular de MDA-MB-231 con extracciones de β -glucanos de avena y β -glucano comercial después de 24 h, n=4. Las barras de error representan desviación estándar, y las diferencias estadísticamente significativas ($p \leq 0.05$) entre el control y los tratamientos se indican con diferentes letras (a-f). Fuente: Autoría propia

7.4 Efecto de los β -glucanos de cebada y avena en la morfología celular

El proceso desde el crecimiento de la línea celular MDA-MB-231, hasta la inducción de muerte celular tras el tratamiento con β -glucanos de cebada y avena a una concentración de 500 $\mu\text{g/mL}$, (debido a que son los extractos con mayor pureza 76.0 y 74.58%, respectivamente) obtenidos

mediante extracción por 20 min, observados a través de un microscopio manual invertido (Leica, DMI 3000 B, Alemania), como se muestran en la Figura 32. En el inciso (a) y (e), las células fueron incubadas hasta alcanzar una confluencia del 80% y posteriormente cultivadas en una placa de 96 pocillos hasta obtener una confluencia cercana al 100% como se ilustra en el inciso (b) y (f), momento en que aplicaron los β -glucanos de cebada y avena, respectivamente. En el inciso (c) y (g) se identifica contracción celular, adquiriendo una morfología circular, indicativa de estrés tras el contacto con los extractos. En este cambio morfológico se asocia con los eventos característicos de la apoptosis, como la condensación y marginación de la cromatina, el rizado de la membrana plasmática y la contracción celular (Van-Cruchten & Van-Den, 2002). Cabe destacar que, en el caso de la avena, la contracción celular fue más evidente en comparación con la de la cebada. Finalmente, en los incisos (d) y (h) se observa que después de las 24 h de exposición a los β -glucanos, las células ya no presentan una membrana plasmática definida y muestra fragmentos celulares propios de un proceso apoptótico.

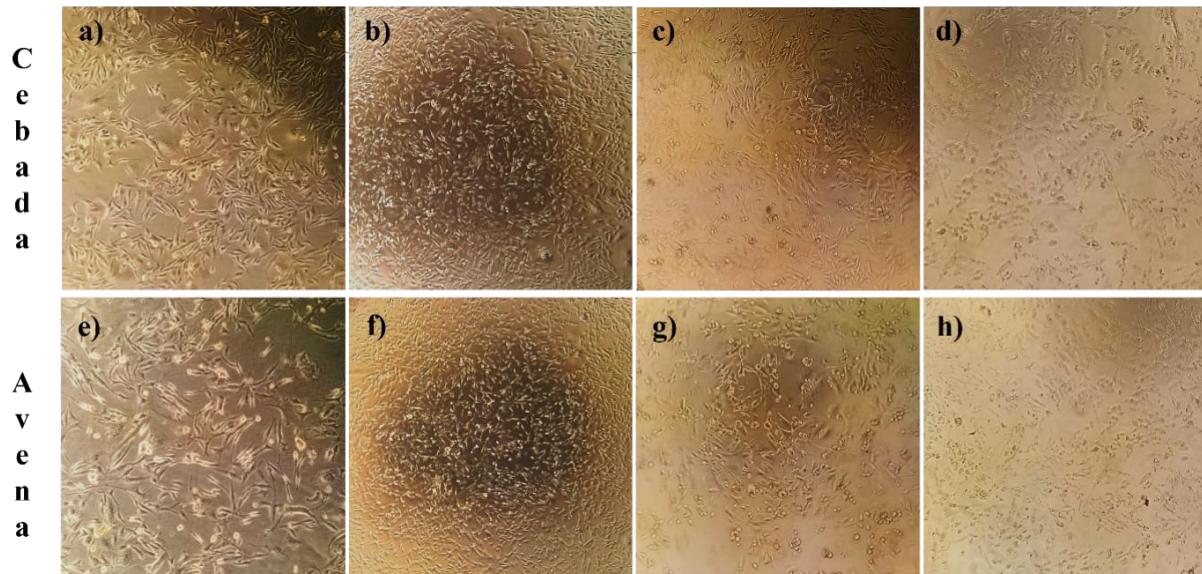


Figura 32: Imágenes de la línea celular MDA-MB-231 a través de microscopio con el objetivo 40x. (a, e) en frascos de cultivo con una confluencia del 80%; (b, f) con una confluencia del 100% en placa de 96 pocillos; (c) aplicación de β -glucanos de cebada a la línea celular; (g) aplicación de β -glucanos de avena a la línea celular; (d, h) aplicación de β -glucanos a la línea celular después de las 24 h. Fuente: Autoría propia

7.5 Concentración inhibitoria 50 (IC_{50}) de los β -glucanos en la línea celular MDA-MB-231

Con base a los resultados previamente expuestos, los β -glucanos comerciales y extraídos de granos de cebada y avena aplicados a la línea celular MDA-MB-231 en concentraciones de 125, 250 y 500

$\mu\text{g}/\text{mL}$, no alcanzaron un porcentaje de inhibición superior al 50%. En consecuencia, no fue posible realizar el análisis de viabilidad celular mediante la curva dosis-respuesta, ya que dicho modelo requiere al menos dos valores por arriba y dos por debajo del 50% de inhibición para permitir una interpolación en el punto medio de manera estadísticamente sólida. Por lo tanto, se recomienda que se evalúen concentraciones superiores a 500 μg de β -glucanos/ mL en esta línea celular, con el fin de obtener datos que permitan una determinación del efecto inhibitorio.

8. CONCLUSIONES

El método de extracción empleado mediante ultrasonido influyó de manera significativa en el rendimiento y la pureza de los β -glucanos obtenidos a partir de cebada y avena. Se determinó que el tiempo de extracción óptimo fue de 20 min en ambos granos, ya que permitió alcanzar un equilibrio en ambas determinaciones. Sin embargo, se detectó que en tiempos de exposición superiores a 20 min provocaron una disminución en la pureza, asociada a la liberación de compuestos intracelulares. Estos resultados subrayan la importancia del control del parámetro de tiempo durante proceso de extracción asistida por ultrasonido, con el fin de preservar la integridad estructural y funcional de los β -glucanos, garantizando así su actividad biológica óptima.

La concentración de 500 μg de β -glucanos/mL fue la que mostró mayor efecto anticancerígeno tanto en las extracciones como en el β -glucano comercial, sobre la línea celular MDA-MB-231, correspondiente a un tipo de cáncer de mama triple negativo, siendo relevante debido a que dicha línea celular se caracteriza por alta agresividad, capacidad metastásica y resistencia a tratamientos convencionales, debido a la ausencia de sus receptores. Los resultados sugieren que los β -glucanos ejercen una acción citotóxica dosis-respuesta, relacionada con la modulación de vías de señalización intracelular y así inducir a la apoptosis. Estos efectos evidencian el potencial terapéutico de los β -glucanos como estrategias alternativas para este tipo de cáncer.

Las fuentes naturales de β -glucanos de cebada y avena, demostraron poseer un potencial biológico al inhibir un porcentaje considerable de células MDA-MB-231. Este resultado confirma que ambos granos representan materias primas viables y sostenibles para la obtención de compuestos con actividad anticancerígena, contribuyendo así a la búsqueda de alternativas naturales para la prevención y tratamiento complementario del cáncer de mama.

9. REFERENCIAS

- Abebaw, G. (2021). Review on Structure, Functional and Nutritional Composition of Barley (*Hordeum vulgare*). *Nutrition and Food Processing*, 4(2), 01–08. <https://doi.org/10.31579/2637-8914/046>
- Alemayehu, G. F., Forsido, S. F., Tola, Y. B., & Amare, E. (2023). Nutritional and Phytochemical Composition and Associated Health Benefits of Oat (*Avena sativa*) Grains and Oat-Based Fermented Food Products. In *Scientific World Journal* (Vol. 2023). Hindawi Limited. <https://doi.org/10.1155/2023/2730175>
- Almalki, S. G. (2023). The pathophysiology of the cell cycle in cancer and treatment strategies using various cell cycle checkpoint inhibitors. In *Pathology Research and Practice* (Vol. 251). Elsevier GmbH. <https://doi.org/10.1016/j.prp.2023.154854>
- Aly, A. A., Zaky, E. A., Mahmoud, H. A., Alrefaei, A. F., Hameed, A. M., Alessa, H., Alsimaree, A. A., Aljohani, M., El-Bahy, S. M., & Kadasah, S. (2021). The Impact of Addition Oats (*Avena sativa*) and Cinnamon on Cookies and their Biological Effects on Rats Treated with Cirrhosis by CCL4. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(12), 7142–7151. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.08.010>
- Alzorqi, I., Sudheer, S., Lu, T. J., & Manickam, S. (2017). Ultrasonically extracted β-D-glucan from artificially cultivated mushroom, characteristic properties and antioxidant activity. *Ultrasonics Sonochemistry*, 35, 531–540. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.04.017>
- AOAC. (2015). *Official Methods of Analysis of AOAC International* (Gaithersburg, E.U.U., Vol. 20).
- ATCC. (2024). *MDA-MB-231*. <https://www.atcc.org/products/htb-26>
- Bai, J., Ren, Y., Li, Y., Fan, M., Qian, H., Wang, L., Wu, G., Zhang, H., Qi, X., Xu, M., & Rao, Z. (2019). Physiological functionalities and mechanisms of β-glucans. In *Trends in Food Science and Technology* (Vol. 88, pp. 57–66). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.03.023>
- Bieniek, A., & Buksa, K. (2024). The Influence of Oat β-Glucans of Different Molar Mass on the Properties of Gluten-Free Bread. *Molecules*, 29(19), 4579. <https://doi.org/10.3390/molecules29194579>
- Bobade, H., Gupta, A., & Sharma, S. (2021). Beta-glucan. In *Nutraceuticals and Health Care* (pp. 343–358). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-89779-2.00013-2>
- Butt, M. S., Tahir-Nadeem, M., Khan, M. K. I., Shabir, R., & Butt, M. S. (2008). Oat: Unique among the cereals. In *European Journal of Nutrition* (Vol. 47, Issue 2, pp. 68–79). <https://doi.org/10.1007/s00394-008-0698-7>
- Cao, H., Li, R., Li, S., Song, H., Huang, K., Zhang, Y., Lu, J., & Guan, X. (2024). Unravelling the synergistic effect of incorporation of β-glucan and high intensity ultrasound treatment on the stability of highland barley milk. *Food Hydrocolloids*, 147. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.109396>

- Castillo Olvera, F., Rodríguez Sanoja, R., Prieto García, F., & Román Gutiérrez, A. D. (2012). Caracterización Física y Química Proximal de Paja, Grano y Almidón de Cebada de la Variedad Esmeralda. *BioTecnología*, 16, 11.
- Chew, N. J., Nguyen, E. V., Su, S. P., Novy, K., Chan, H. C., Nguyen, L. K., Luu, J., Simpson, K. J., Lee, R. S., & Daly, R. J. (2020). FGFR3 signaling and function in triple negative breast cancer. *Cell Communication and Signaling*, 18(1). <https://doi.org/10.1186/s12964-019-0486-4>
- Chiozzi, V., Eliopoulos, C., Markou, G., Arapoglou, D., Agriopoulou, S., El Enshasy, H. A., & Varzakas, T. (2021). Biotechnological addition of β -glucans from cereals, mushrooms and yeasts in foods and animal feed. In *Processes* (Vol. 9, Issue 11). MDPI. <https://doi.org/10.3390/pr9111889>
- Choromanska, A., Kulbacka, J., Harasym, J., Oledzki, R., Szewczyk, A., & Saczko, J. (2018). High-and low-Molecular Weight oat Beta-Glucan Reveals Antitumor Activity in Human Epithelial Lung Cancer. *Pathology and Oncology Research*, 24(3), 583–592. <https://doi.org/10.1007/s12253-017-0278-3>
- Climova, A., Ibrahim, M. N. G., Salamahina, A., Savin, A. M., Dukhinova, M. S., Barakova, N. V., & Krivoshapkina, E. F. (2021). Application of extracted β -glucan from oat for β -carotene encapsulation. *Journal of Food Science and Technology*, 58(7), 2641–2650. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04770-2>
- Cui, Y., Han, X., Hu, X., Li, T., & Li, S. (2023). Distinctions in structure, rheology, antioxidation, and α -glucosidase inhibitory activity of β -glucans from different species. *International Journal of Biological Macromolecules*, 253. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.127684>
- CXS 201- 1995. (2019). *Codex Alimentarius*. https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/sh-proxy/en/?lnk=1&url=https%253A%252F%252Fworkspace.fao.org%252Fsites%252Fcodex%252FStandards%252FCXS%2B201-1995%252FCXS_201s.pdf
- Dourson, M. L., & Pournourmohammadi, S. (2014). Levels of Effect in Toxicology Assessment. In *Encyclopedia of Toxicology*: Third Edition (pp. 66–67). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386454-3.00625-4>
- FAO. (2024). *Cultivos y productos de ganadería. Organización de Las Naciones Unidas Para La Alimentación y La Agricultura*. <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL/visualize>
- Fu, Y., Lin, S., Lu, M., Wei, S. Y., Zhou, J., Zhao, L., Zhang, Q., Lin, D. R., Liu, Y. T., Chen, H., Qin, W., & Wu, D. T. (2019). Quantitative evaluation of ultrasound-assisted extraction of 1,3- β -glucans from dictyophora indusiata using an improved fluorometric assay. *Polymers*, 11(5). <https://doi.org/10.3390/polym11050864>
- Garcia-Contreras, R., Acosta-Torres, L., Pilar, M. Del, & Torres, R. (2019). Manual para la enseñanza práctica del ENSAYO MTT PARA EVALUAR LA CITOTOXICIDAD DE NANOPARTÍCULAS. <https://www.researchgate.net/publication/336348823>

- Geller, A., Shrestha, R., & Yan, J. (2019). Yeast-derived β -glucan in cancer: Novel uses of a traditional therapeutic. In *International Journal of Molecular Sciences* (Vol. 20, Issue 15). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/ijms20153618>
- Hemati Sourki, A., Koocheki, A., & Elahi, M. (2017). Ultrasound-assisted extraction of β -D-glucan from hull-less barley: Assessment of physicochemical and functional properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 95, 462–475. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.10.111>
- Idehen, E., Tang, Y., & Sang, S. (2017). Bioactive phytochemicals in barley. In *Journal of Food and Drug Analysis* (Vol. 25, Issue 1, pp. 148–161). Elsevier Taiwan LLC. <https://doi.org/10.1016/j.jfda.2016.08.002>
- Ihsan, M., Nazir, N., Ghafoor, A., Khalil, A. A. K., Zahoor, M., Nisar, M., Khames, A., Ullah, R., & Shah, A. B. (2021). Genetic diversity in local and exotic *avena sativa l.* (oat) germplasm using multivariate analysis. *Agronomy*, 11(9). <https://doi.org/10.3390/agronomy11091713>
- INIFAP. *Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, A. y P.* (2023, May 26). Destacan investigaciones en cebada del INIFAP. <https://www.gob.mx/inifap/prensa/destacan-investigaciones-en-cebada-del-inifap>
- Izydoreczk, M. S., & Dexter, J. E. (2015). Barley: Milling and Processing. In *Encyclopedia of Food Grains: Second Edition* (Vols. 3–4, pp. 434–445). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394437-5.00154-6>
- Khan, S. A., Dar, A. H., Bhat, S. A., Fayaz, J., Makroo, H. A., & Dwivedi, M. (2020). High Intensity Ultrasound Processing in Liquid Foods. In *Food Reviews International* (Vol. 38, Issue 6, pp. 1123–1148). Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/87559129.2020.1768404>
- Kouřimská, L., Sabolová, M., Horčíčka, P., Rys, S., & Božík, M. (2018). Lipid content, fatty acid profile, and nutritional value of new oat cultivars. *Journal of Cereal Science*, 84, 44–48. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2018.09.012>
- Lanning, N. J., Castle, J. P., Singh, S. J., Leon, A. N., Tovar, E. A., Sanghera, A., MacKeigan, J. P., Filipp, F. V., & Graveel, C. R. (2017). Metabolic profiling of triple-negative breast cancer cells reveals metabolic vulnerabilities. *Cancer & Metabolism*, 5(1). <https://doi.org/10.1186/s40170-017-0168-x>
- Lante, A., & Canazza, E. (2023). Insight on Extraction and Preservation of Biological Activity of Cereal β -D-Glucans. In *Applied Sciences (Switzerland)* (Vol. 13, Issue 19). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/app131911080>
- Li, Y., You, M., Liu, H., & Liu, X. (2021). Comparison of distribution and physicochemical properties of β -glucan extracted from different fractions of highland barley grains. *International Journal of Biological Macromolecules*, 189, 91–99. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.08.094>
- Lin, H., Han, R., & Wu, W. (2024). Glucans and applications in drug delivery. In *Carbohydrate Polymers* (Vol. 332). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.121904>

- Lin, S., Guo, H., Lu, M., Lu, M. Y., Bu Gong, J. D., Wang, L., Zhang, Q., Qin, W., & Wu, D. T. (2018). Correlations of molecular weights of β -glucans from Qingke (Tibetan hullless barley) to their multiple bioactivities. *Molecules*, 23(7). <https://doi.org/10.3390/molecules23071710>
- Liu, H., Li, Y., You, M., & Liu, X. (2021). Comparison of physicochemical properties of β -glucans extracted from hull-less barley bran by different methods. *International Journal of Biological Macromolecules*, 182, 1192–1199. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.05.043>
- Lukinac, J., & Jukić, M. (2022). Barley in the Production of Cereal-Based Products. In *Plants* (Vol. 11, Issue 24). MDPI. <https://doi.org/10.3390/plants11243519>
- Manolache, F., Hanganu, A., Eglantina Duta, D., Belc, N., & Ioan Marin, D. (2013). The Physico-chemical and Spectroscopic Composition Characterization of Oat Grains and Oat Oil Samples. In *REV. CHIM. (Bucharest)* ♦ (Vol. 64, Issue 1). <http://www.revistadechimie.ro>
- Marrez, D. A., & Ayesh, A. M. (2022). Mycotoxins: The threat to food safety. In *Egyptian Journal of Chemistry* (Vol. 65, Issue 1, pp. 353–372). NIDOC (Nat.Inform.Document.Centre). <https://doi.org/10.21608/EJCHEM.2021.80490.3987>
- Megazyme. (2025). β -Glucan Assay Kit (Mixed Linkage). <https://www.megazyme.com/beta-glucan-assay-kit>
- Morales, D., Smiderle, F. R., Villalva, M., Abreu, H., Rico, C., Santoyo, S., Iacomini, M., & Soler-Rivas, C. (2019). Testing the effect of combining innovative extraction technologies on the biological activities of obtained β -glucan-enriched fractions from *Lentinula edodes*. *Journal of Functional Foods*, 60. <https://doi.org/10.1016/j.jfff.2019.103446>
- NMX-FF-043-SCFI-2003. (2003). Productos alimenticios no industrializados para consumo humano-cereal-cebada maltera (*Hordeum vulgare L.* y *Hordeum distichum L.*)-Especificaciones y métodos de prueba. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, México.
- OMS. (2020, February 2). *Cáncer*. Organización Mundial de La Salud. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/cancer#:~:text=El%20c%C3%A1ncer%20es%20la%20principal,colon%20y%20recto%20y%20pr%C3%B3stata>.
- Palmero Picazo, J., Lassard Rosenthal, J., Juárez Aguilar, L. A., & Medina Núñez, C. A. (2021). Cáncer de mama: una visión general. *Acta Médica Grupo Ángeles*, 19(3), 354–360. <https://doi.org/10.35366/101727>
- Parzonko, A., Makarewicz-Wujec, M., Jaszewska, E., Harasym, J., & Kozłowska-Wojciechowska, M. (2015). Pro-apoptotic properties of (1,3)(1,4)- β -d-glucan from *Avena sativa* on human melanoma HTB-140 cells *in vitro*. *International Journal of Biological Macromolecules*, 72, 757–763. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2014.09.033>
- Quiñones-Muñoz, T. A., Villanueva-Rodríguez, S. J., & Torruco-Uco, J. G. (2022). Nutraceutical Properties of *Medicago sativa L.*, *Agave spp.*, *Zea mays L.* and *Avena sativa L.*: A Review of Metabolites and Mechanisms. In *Metabolites* (Vol. 12, Issue 9). MDPI. <https://doi.org/10.3390/metabo12090806>

- Raemy, A., May, L., Sala, N., Diezi, M., Beck-Popovic, M., & Broome, M. (2024). Anti-MAPK Targeted Therapy for Ameloblastoma: Case Report with a Systematic Review. In *Cancers* (Vol. 16, Issue 12). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/cancers16122174>
- Rusin, M. (2024). The p53 protein – not only the guardian of the genome. *Postepy Biochemii*, 70(1), 71–87. https://doi.org/10.18388/pb.2021_518
- Sánchez-Díez, M., Romero-Jiménez, P., Alegría-Aravena, N., Gavira-O'Neill, C. E., Vicente-García, E., Quiroz-Troncoso, J., González-Martos, R., Ramírez-Castillejo, C., & Pastor, J. M. (2025). Assessment of Cell Viability in Drug Therapy: IC50 and Other New Time-Independent Indices for Evaluating Chemotherapy Efficacy. *Pharmaceutics*, 17(2). <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics17020247>
- Schmidt, M. (2022). Cereal beta-glucans: an underutilized health endorsing food ingredient. In Critical Reviews in *Food Science and Nutrition* (Vol. 62, Issue 12, pp. 3281–3300). Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1864619>
- Simón, M. R., & Golik, S. I. (2022). *Cereales de invierno*. Edulp.
- Sousa, P., Tavares-Valente, D., Amorim, M., Azevedo-Silva, J., Pintado, M., & Fernandes, J. (2023). β-Glucan extracts as high-value multifunctional ingredients for skin health: A review. In *Carbohydrate Polymers* (Vol. 322). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.121329>
- Swanston, R. P., & Ellis, J. S. (2002). Genetics and Breeding of Malt Quality Attributes. In Barley Science: Recent Advances from Molecular Biology to Agronomy of Yield and Quality; Slafer, G.A., Molina-Cano, J.L., Savin, R., Araus, J.L., Romagosa, I., Eds.; Haworth Press: Binghamton, NY, USA; pp. 85-114.
- Terán Céspedes, R., Claure Herrera, A. A., & Alba Maydana, R. (2023). La producción de avena (*Avena sativa*) en grano: un integrador agroecológico en los sistemas de producción familiar. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, 10(2), 41–51. <https://doi.org/10.53287/dfte6896cy60d>
- Van Cruchten, S., & Van Den Broeck, W. (2002). Morphological and Biochemical Aspects of Apoptosis, Oncosis and Necrosis. *Anatomia, Histologia, Embryologia*, 31, 214–223. <https://doi.org/https://doi.org/10.1046/j.1439-0264.2002.00398.x>
- Varnosfaderani, S. M. N., Ebrahimzadeh, F., Oryani, M. A., Khalili, S., Almasi, F., Heris, R. M., Payandeh, Z., Li, C., Afjadi, M. N., & Bahrami, A. A. (2024). Potential promising anticancer applications of β-glucans: a review. In *Bioscience Reports* (Vol. 44, Issue 1). Portland Press Ltd. <https://doi.org/10.1042/BSR20231686>
- Welsh, J. (2017). Chapter 35 - Modeling Breast Cancer in Animals—Considerations for Prevention and Treatment Studies. In *Animal Models for the Study of Human Disease*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809468-6/00035-8>

- Wotango, E. M., & Kanido, C. K. (2024). Nutritional value and mineral content analysis of selected landrace barley (*Hordeum vulgare L*) varieties grown in highland area of Wolaita zone, Ethiopia. *Journal of Agriculture and Food Research*, 15. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101079>
- Wu, L., Zhao, J., Zhang, X., Liu, S., & Zhao, C. (2021). Antitumor effect of soluble β -glucan as an immune stimulant. In *International Journal of Biological Macromolecules* (Vol. 179, pp. 116–124). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.02.207>
- Wu, W., Wu, M. Y., Dai, T., Ke, L. N., Shi, Y., Hu, J., & Wang, Q. (2024). Terphenyllin induces CASP3-dependent apoptosis and pyroptosis in A375 cells through upregulation of p53. *Cell Communication and Signaling*, 22(1). <https://doi.org/10.1186/s12964-024-01784-7>

10. ANEXOS



UNIVERSIDAD DE
GUANAJUATO



A través del Campus de Celaya Salvatierra, de la División de Ciencias de la Salud e
Ingenierías y del Departamento de Ingeniería Agroindustrial

Otorgan la presente

CONSTANCIA

a

Arely Vega Domínguez, Aurora, Quintero Lira, Javier, Piloni Martini, Rubén Jiménez
Alvarado, Teresita Spezzia Mazzocco

por haber presentado el trabajo en modalidad oral

Extracción de β -glucanos de cebada (*Hordeum vulgare*) y champiñón (*Agaricus bisporus*) por ultrasonido

en el marco del

1er. FORO MULTIDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIÓN
"DESARROLLO E INNOVACIÓN"

y CONGRESO MULTIDISCIPLINARIO INTERNACIONAL DE INGENIERÍAS 2024, realizado
en el Campus Celaya-Salvatierra en la Ciudad de Celaya, Guanajuato del 14 al 18 de
octubre. Esta constancia avala 25 horas crédito.

"La Verdad Os Hará Libres"

Celaya, Guanajuato 14 de octubre del 2024


Dr. José Marcelino Gutiérrez Villalobos
Director de Departamento de
Ingeniería Agroindustrial

SECRETARIA DE EDUCACIÓN PÚBLICA DE HIDALGO
SUBSECRETARIA DE EDUCACIÓN BÁSICA
DIRECCIÓN GENERAL DE EDUCACIÓN BÁSICA
DIRECCIÓN DE EDUCACIÓN ESPECIAL
SUPERVISIÓN DE ZONA No. 13
UNIDAD DE SERVICIOS DE APOYO A LA EDUCACIÓN REGULAR No. 21
CCT 13FUA0021X



Tulancingo, Hgo. enero 2024.

CONSTANCIA

Por medio de la presente, hago constar que el:

Arely Vega Domínguez
Del Instituto de Ciencias Agropecuarias

Impartió el Taller “Elaboración de jabones” a los alumnos de la Escuela Primaria Cristóbal Colón de Santa Elena Paliseca, Municipio de Cuautepec de Hinojosa, Hgo. como parte del acceso universal al conocimiento.

Se extiende la presente a los treinta y un días del mes de enero del año dos mil veinticuatro, en la ciudad Tulancingo de Bravo, Hgo., para los fines que a la interesada convengan.

ATENTAMENTE



PROFA. HELADIA ACOSTA MORENO
DIRECTORA DE LA ESCUELA PRIMARIA
CRISTÓBAL COLÓN

c.c.p. Archivo





Noche de las Estrellas hace entrega del siguiente

Reconocimiento

A:

Arely Vega Domínguez , Ernesto Guzmán Zárate, Magdalena Bravo Cruz

Por su invaluable participación en la impartición del Taller **Plasti-Lab “ Modelando Ciencia ”** desarrollado en la noche de Estrellas 2024

Estación Terrena de Tulancingo Hgo., realizado el 9 de Noviembre 2024.

SEDE TULANCINGO, Hgo.

Dr. David M. Gale, INAOE
Comité organizador local.



COMITÉ NACIONAL DE LA NOCHE DE LAS ESTRELLAS





Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Constancia No. RUT-CP-2024-080

La Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Otorga la presente

CONSTANCIA

a

Ing. Arely Vega Domínguez

Alumna de la Maestría en Ciencia de los Alimentos de la Universidad Autónoma
del Estado de Hidalgo (UAEH).

Por su participación en “*Radio Universidad Tulancingo*”, en la emisión del
programa radiofónico “**Con-Ciencia ICap**”, misma que se transmitió el 7 de agosto
de 2024 en esta emisora, abordando el tema: “Trabajos de Investigación del Cuerpo
Académico de Alimentos de Origen Vegetal”.

Amor, Orden y Progreso.

Tulancingo de Bravo, Hgo., a 23 de agosto del 2024

Lic. Anuar Jotar Magdaleno

DIRECTOR DE RADIO UAEH TULANCINGO

