

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



SÍNTESIS BIOLÓGICA DE NANOPARTÍCULAS DE SELENIO CON QUITOSANO
Y SU IMPACTO EN LA GERMINACIÓN DE TRIGO (*Triticum* spp.)

Tesis

Que presenta ERIKA GUADALUPE CERVANTES PADRON

como requisito parcial para obtener el Grado de
MAESTRO EN CIENCIAS EN PRODUCCIÓN AGROPECUARIA

Torreón, Coahuila

Noviembre 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



SÍNTESIS BIOLÓGICA DE NANOPARTÍCULAS DE SELENIO CON QUITOSANO
Y SU IMPACTO EN LA GERMINACIÓN DE TRIGO (*Triticum spp.*)

Tesis

Que presenta ERIKA GUADALUPE CERVANTES PADRON
como requisito parcial para obtener el Grado de
MAESTRO EN CIENCIAS EN PRODUCCIÓN AGROPECUARIA

Dra. Dalia Ivette Carrillo Moreno
Director (UAAAN)

Dra. Jazmin Monserrat Gaucin Delgado
Co-Director (UPGOP)

Torreón, Coahuila

Noviembre 2025

SÍNTESIS BIOLÓGICA DE NANOPARTÍCULAS DE SELENIO CON QUITOSANO
Y SU IMPACTO EN LA GERMINACIÓN DE TRIGO (*Triticum* spp.)

Tesis

Elaborada por ERIKA GUADALUPE CERVANTES PADRON como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Producción Agropecuaria con la supervisión y aprobación del Comité de Asesoría



Dra. Dalia Ivette Carrillo Moreno
Director de Tesis



Dra. Jazmin Monserrat Gaucin Delgado
Asesor



Dr. José Luis Reyes Carrillo
Asesor



Dr. Anselmo González Torres
Asesor



Dra. Dalia Ivette Carrillo Moreno
Jefe del Departamento de Postgrado



Dr. Antonio Flores Naveda
Subdirector de Postgrado

AGRADECIMIENTOS

A mi familia. Por apoyarme siempre y darme las herramientas para seguir con mis estudios.

A mi alma mater. Porque allí pasé momentos inolvidables y donde conocí gente muy importante que me dieron consejos muy valiosos.

A mis asesores. Dra. Jazmín Monserrat Gaucin Delgado, por compartir su conocimiento en un tema totalmente nuevo para mí y brindar un apoyo tanto de confianza como de paciencia, Dr. Ricardo Israel Ramírez Gottfried, por darme la oportunidad de trabajar en este proyecto.

Dra. Dalia Ivette Carrillo Moreno, Dr. José Luis Reyes Carrillo y Dr. Anselmo González Torres por aceptar ser parte del comité en mi tesis.

DEDICATORIA

Esta tesis está dedicada con gran sentimiento **a mi familia** que en los cuatro años y medio de mi carrera y dos años de maestría me apoyaron incondicionalmente, económicamente y moralmente para culminar mi carrera profesional.

A mis padres **Edgardo Cervantes Álvarez** y **Paula Padrón Solís** que siempre me impulsaron para continuar con mis estudios, brindándome su apoyo en todo momento.

A mis hermanos **Irma Lucero, Amado Edgardo y Paul Eduardo Cervantes Padrón** que estuvieron al pendiente de lo que me hiciera falta para seguir adelante dándome también todo su apoyo.

A mis hijos **Yaelí Guadalupe y Cristian Mateo Solís Cervantes**. Quienes me motivan a ser quien soy y continuar superándome día con día.

A **Irma Manuela Alvarez Reyna** mi “welita” por brindarme y abrirme las puertas de su casa para poder ir a trabajar cuando más económicamente lo necesite de marzo a junio del 2022.

A la familia **Rivera Bailón** que son parte importante en mi vida al ser mi segunda familia y también me dan todo su apoyo y consejos brindándome todo su cariño.

A **Cristian Oswaldo Solís López** el último, pero no menos importante, quien me ha acompañado y apoyado en todos los momentos a lo largo de la carrera y maestría hasta hoy.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	i
DEDICATORIA	ii
ÍNDICE GENERAL.....	iii
LISTA DE CUADROS	v
LISTA DE FIGURAS	vi
RESUMEN	vii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1 Producción de trigo a nivel mundial, nacional y local	3
2.2 Origen del trigo.....	3
2.3 Clasificación taxonómica.....	4
2.4 Germinados.....	4
2.4.1 Clasificación, tipos y propiedades de los germinados.....	5
2.4.2 Plántula comestible.....	5
2.4.3 Propiedades Nutricionales y Bioactivas de los Germinados	6
2.5 El Germinado de Trigo como Objeto de Estudio	7
2.6 Principales variedades de trigo para el uso del germinado en el consumo humano	7
2.7 Manejo en la producción de germinado de trigo.....	8
2.8 Proceso de Germinación	9
2.8.1 Preparación y Aplicación del Tratamiento.....	9
2.8.2 Fase de Imbibición.....	9
2.8.3 Fase de germinación	10
2.8.4 Fase de crecimiento.....	10
2.9 Consumo de germinados	11
2.9.1 Consumo de germinados en Humanos	11
2.9.2 Consumo de germinados en Animales.....	13
2.10 Riesgos microbiológicos de los germinados.....	14
2.11 Control de calidad de los germinados	15
2.12 Uso de promotores para germinación	16
2.13 Uso de elicitores para germinación	16

2.14 Biofortificación en cultivos	16
2.14.2 Biofortificación con selenio	17
2.15 Nanopartículas.....	19
2.15.1 Nanopartículas de Selenio	19
2.15.2 Nanopartículas de selenio en plantas.....	20
2.15.3 Nanopartículas de selenio en personas.....	21
2.16 Quitosano	21
2.16.1 Quitosan en la agricultura.....	21
2.16.2 Características del quitosano	21
2.16.3 Quitosano en plantas	22
2.17 Compuestos bioactivos	22
2.18 Radicales libres.....	22
2.19 Antioxidantes	23
2.20 Compuestos fenilpropanoides.....	23
2.20.1 Compuestos Fenólicos.....	24
2.20.2 Compuestos Flavonoides.....	24
2.21 Vitamina C	25
2.22 Importancia de la actividad enzimática.....	25
2.22.2 Enzimas en las plantas	26
2.22.3 Glutación	26
2.22.4 Catalasa y Peroxidasa	27
2.22.5 Superóxido dismutasa (SOD).....	27
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	28
3.1 Ubicación del experimento y material vegetal	28
3.2 Síntesis de nanopartículas de selenio.....	28
3.2.1 Recolección y procesamiento de material vegetal.....	28
3.2.2 Optimización de procesos y biosíntesis de nanSe.....	29
3.2.3 Caracterización morfológica y fisicoquímica.....	30
3.3 Ensayo de germinación y medición del crecimiento	30
3.4 Proceso de germinación	31
3.5 Parámetros evaluados en el bioensayo	31
3.14 Análisis estadístico.....	35
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	36
VI. REFERENCIAS	49

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Tratamientos establecidos con nanopartículas de selenio (nanSe) y quitosano-selenio (nanSe-CS).....	31
Cuadro 2. Comparación de medias para el porcentaje de germinación y vigor, así peso fresco del brote y de raíz de semillas de trigo tratadas con NPs Se-CS.	39

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Preparación Experimental (Pre-tratamiento).....	99
Figura 2. Fase de Imbibición.....	100
Figura 3. Fase de germinación	10
Figura 4. Fase de crecimiento.....	11
Figura 5. Beneficio de consumo de germinados en Humanos.....	13
Figura 6. Beneficio del consumo de germinados en Animales	14
Figura 7. Escala de Nanopartículas (1 -100 nm).....	19
Figura 8. Esquema de compuestos fenólicos.....	24
Figura 9. Biosíntesis de nanSe	30
Figura 10. Tamaño de nanopartículas de selenio (nanSe)	37
Figura 11. Patrones de muestra de XRD de polvo de nanSe obtenidos mediante síntesis verde con extracto de fruto de granada y Na_2SeO_3	3837
Figura 12. Espectros de (a) Transformada de Fourier Infrarroja (FTIR) y (b) Ultravioleta-Visible (UV-Vis) de nanSe.	39
Figura 13. Efecto de nanSe y nanSeCS sobre (a) contenido fenólico total, (b) flavonoides, (c) antioxidantes totales, clorofila total (d), vitamina C (e) y glutación(f) en germinados de trigo	43
Figura 14.- Efecto de las dosis de nanSe y nanSeCS sobre el contenido de superoxidodismutasa (SOD) (a), catalase (CAT) (b), y selenio en germinados de trigo (c).....	45
Figura 15.- Efecto de las dosis de nanSe y nanSeCS sobre el contenido y selenio en germinados de trigo	47

RESUMEN

Síntesis biológica de nanopartículas de selenio con quitosano y su impacto en la germinación de trigo (*Triticum* spp.)

Erika Guadalupe Cervantes Padron
Maestría en Ciencias en Producción Agropecuaria
Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro

Dra. Dalia Ivette Carrillo Moreno
Director de tesis

La deficiencia de selenio (Se) en la dieta humana es un problema de salud pública a nivel global. En este estudio, se evaluó la síntesis biológica de nanopartículas de selenio funcionalizadas con quitosano (nanSe-CS) para mejorar su estabilidad, biocompatibilidad y efectividad como vehículo y protector celular. Mediante un diseño factorial 2 x 7, se analizó el efecto del tipo de nanopartícula (nanSe vs. nanSe-CS) y la concentración (0, 0.10, 0.15, 1.0, 1.5, 2.0 y 2.5 mg mL⁻¹) durante la imbibición sobre el crecimiento, la producción de antioxidantes no enzimáticos y la actividad de enzimas antioxidantes en germinados de trigo (*Triticum* spp.), cultivados bajo condiciones controladas (25 ± 2 °C, 7 días en oscuridad). El análisis de varianza (ANOVA) reveló que el efecto de la concentración depende críticamente del tipo de nanopartícula, identificándose una dosis óptima de 0.15 mg mL⁻¹ para ambos tratamientos. A esta concentración, el tratamiento con nanSe-CS indujo una respuesta sinérgica significativamente mayor que la nanSe sola, incrementó el peso fresco (+68 % vs. control), los antioxidantes no enzimáticos (+25 %) y la actividad enzimática (+36 %), evidenciando el rol del quitosano como vehículo y bioestimulante. Se concluye que la biofortificación con nanSe-CS a 0.15 mg mL⁻¹ es la combinación óptima para producir germinados de trigo biofortificados con un perfil nutracéutico superior.

Palabras clave: Antioxidantes, Biofortificación, Interacción, Selenio, Alimento funcional

ABSTRACT

Biological synthesis of selenium nanoparticles with chitosan and their impact on wheat (*Triticum* spp.) germination

Erika Guadalupe Cervantes Padron
Maestría en Ciencias en Producción Agropecuaria
Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro

Dra. Dalia Ivette Carrillo Moreno
Director de tesis

Selenium (Se) deficiency in the human diet is a global public health problem. In this study, the biological synthesis of chitosan-functionalized selenium nanoparticles (nanSe-CS) was evaluated to improve their stability, biocompatibility, and effectiveness as a vehicle and cell protector. Using a 2 x 7 factorial design, the effect of the nanoparticle type (nanSe vs. nanSe-CS) and concentration (0, 0.10, 0.15, 1.0, 1.5, 2.0, and 2.5 mg mL⁻¹) during imbibition on growth, non-enzymatic antioxidant production, and antioxidant enzyme activity in wheat sprouts (*Triticum* spp.) grown under controlled conditions (25 ± 2 °C, 7 days in darkness) was analyzed. Analysis of variance (ANOVA) revealed that the concentration effect critically depends on the nanoparticle type, identifying an optimal dose of 0.15 mg mL⁻¹ for both treatments. At this concentration, treatment with nanSe-CS induced a significantly greater synergistic response than nanSe alone, increasing fresh weight (+68 % vs. control), non-enzymatic antioxidants (+25 %), and enzymatic activity (+36 %), demonstrating the role of chitosan as a carrier and biostimulant. It is concluded that biofortification with nanSe-CS at 0.15 mg mL⁻¹ is the optimal combination for producing biofortified wheat sprouts with a superior nutraceutical profile.

Keywords: Antioxidants, Biofortification, Interaction, Selenium, Functional food.

I. INTRODUCCIÓN

En la agricultura moderna enfrentamos un gran desafío para incrementar la productividad y la calidad nutricional de los cultivos para una población en crecimiento, mientras mitiga su impacto ambiental en un contexto de recursos naturales cada vez más precarios, como el agua y el suelo fértil (Treviño López *et al.*, 2021). En este escenario, la biofortificación de cultivos básicos emerge como una estrategia sostenible para enriquecer los alimentos con micronutrientes esenciales, abordando directamente problemas de salud pública como las deficiencias nutricionales.

El trigo (*Triticum* spp.) es un cultivo fundamental para la seguridad alimentaria global, representando entre el 18% y el 20% de todas las calorías consumidas (Morgounov *et al.*, 2019). En México, su importancia es histórica y económica, con el estado de Sonora como principal productor. Cabe destacar que más del 90% de su producción depende del riego, debido a las condiciones áridas y semiáridas predominantes (Hernandez-Ochoa *et al.*, 2018; SENASICA, 2024), lo que acentúa la necesidad de prácticas eficientes y sostenibles.

Entre los micronutrientes críticos se encuentra el selenio (Se), un oligoelemento esencial con funciones biológicas cruciales, cuya deficiencia en la dieta afecta a millones de personas. Sin embargo, su toxicidad depende de su dosis y forma química. Recientemente, las nanopartículas de selenio (nanSe) han ganado atención por su elevada capacidad antioxidante, actividad antitumoral y, significativamente, por presentar una menor citotoxicidad comparado con las formas orgánicas e inorgánicas tradicionales (selenito, selenato) (Moreno-Martín, Espada-Bernabé, Gómez-Gómez, LeónGonzález, & Madrid, 2022). Esta característica las convierte en una herramienta prometedora para aplicaciones agroalimentarias, específicamente en la biofortificación.

La síntesis biológica de nanSe representa un avance significativo en la nanotecnología agrícola, ya que ofrece un método ecológico y sostenible para la producción de nanopartículas mediante el uso de extractos vegetales, microorganismos o biomoléculas, evitando el empleo de químicos tóxicos y

reduciendo los impactos ambientales (Ghidan *et al.*, 2019). Esta aproximación "verde" no solo es ambientalmente amigable, sino que también puede mejorar la biocompatibilidad y actividad biológica de las nanopartículas.

La funcionalización de SeNPs con biopolímeros como el quitosano (nanCS-Se) podría potencialmente mejorar su estabilidad, biodisponibilidad y eficacia como bioestimulante y agente de biofortificación. El quitosano, un biopolímero natural derivado de la quitina, actúa como un agente estabilizante y protector que previene la agregación de las nanopartículas, mejora su dispersión en medios acuosos y facilita su absorción por las plantas (Kumaraswamy *et al.*, 2019). Además, se ha reportado que el quitosano por sí mismo posee propiedades bioestimulantes que pueden potenciar el crecimiento vegetal y la respuesta al estrés (Malerba & Cerana, 2018). Sin embargo, los estudios sobre el efecto de estas nanopartículas híbridas en cultivos como el trigo, y en particular en etapas tempranas de desarrollo como la germinación donde se pueden potenciar compuestos bioactivos, son aún incipientes.

La germinación es un proceso muy importante en el desarrollo de las plantas, donde procesos bioquímicos clave pueden ser modulados para mejorar el perfil nutricional. Los brotes de trigo son reconocidos por su alto contenido de compuestos bioactivos, y la aplicación de nanopartículas durante esta fase podría potencialmente intensificar la acumulación de metabolitos beneficiosos para la salud humana (Ortega-Ortiz *et al.*, 2022).

Por lo tanto, el objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de la aplicación de nanopartículas de selenio (nanSe) obtenidas mediante síntesis biológica de selenio (nanSe-CS) y quitosano en el crecimiento, la acumulación de antioxidantes no enzimáticos y la actividad de enzimas antioxidantes en germinados de trigo, con el fin de determinar su potencial para producir alimentos funcionales de alta calidad nutracéutica de manera sostenible.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Producción de trigo a nivel mundial, nacional y local

Actualmente, a nivel mundial el uso del trigo es muy común, tanto que lo colocan como el tercer cereal más utilizado, tanto en la industria como en la alimentación. El trigo es base de alimentación en diferentes países, principalmente en el continente europeo y asiático. Diversos estudios mencionan que para cubrir las demandas de consumo, el trigo se ha convertido en el segundo grano más sembrado en el mundo, con una producción que supera los 715 millones de toneladas durante los últimos diez años. Del año 2023 al 2024 China fue el mayor productor de trigo a nivel mundial, con una producción aproximada de 136.6 millones de toneladas. La Unión Europea y la India se posicionaron en segundo y tercer puesto respectivamente (Orús, 2024).

En México el trigo representa una superficie de siembra de 669,948 ha, donde se han obtenido 3,511,192 toneladas y un rendimiento promedio de 5.241 Mg ha⁻¹. Los principales estados productores de maíz en México son: Sonora (43 %), Baja California (11 %) Guanajuato (9.3 %), Sinaloa (8.2 %), Michoacán (9.3 %) y Chihuahua (2.3 %), (Flores-Margez, Corral-Díaz, Osuna-Avila, & Hernández-Escamilla, 2021). En la región centro de Coahuila, la producción de trigo harinero representa la siembra de al menos mil 600 hectáreas con una producción de 45 mil 607 toneladas de grano (INIFAP, 2022).

2.2 Origen del trigo

Las principales entradas del trigo a Europa fueron dos: el primer caso se difundió, entre 4000 y 3500 años a.C, siguiendo las cuencas del Danubio y del Rin, atravesando Hungría, Checoslovaquia, Polonia y Alemania. Otra vía fue a costa del Mediterráneo, por donde llegó a España y las islas británicas. Existen evidencias del cultivo de *T.aestivum* ssp. *spelta* en Italia entre el 2900 y 2700 a.C. (Golik, 2022).

2.3 Clasificación taxonómica

En la familia de las gramíneas encontramos al trigo el cual es una planta no perenne, produce un conjunto de frutos modificados que se fusionan con su propia semilla, en una espiga terminal y pueden ser silvestres o cultivadas. Su origen data de la civilización mesopotámica, entre los valles de los ríos Tigris y Éufrates en el Medio Oriente y fueron los egipcios quienes descubrieron la fermentación del trigo y lo usaron en la elaboración de alimentos (Rural, 2022).

Clasificación taxonómica	
Reino	Plantae
Subreino	Viridiplantae
Infrareino	Estreptofita
Superdivisión	Embriofita
División	Traqueofita
Subdivisión	Espermarofita
Clase	Magnoliopsida
Superorden	Lilianae
Orden	Pooles
Familia	Poáceas
Género	<i>Triticum l.</i>

(ITIS, 2010).

2.4 Germinados

La palabra germinado no se encuentra en el diccionario, pero el verbo germinar esta definido como: Comenzar a desarrollarse desde la semilla. Los consumidores pueden utilizar la palabra germinado o brote indistintamente. De acuerdo con la Asociación Europea de Semillas Germinadas (ESSA), un brote es aquel producto que se obtuvo mediante la germinación de semillas, ya sea en agua o en otro medio, que fue recolectado antes de que las hojas verdaderas aparezcan con la finalidad de ser consumido entero. De manera coloquial el

termino brote también se refiere a los brotes tiernos y las hojas pequeñas de las hortalizas, que se consumen en forma de ensaladas (Mejia, 2022).

2.4.1 Clasificación, tipos y propiedades de los germinados

Desde una perspectiva tecnológica y alimentaria, los germinados pueden clasificarse de la siguiente manera:

Por la especie vegetal utilizada:

- **Cereales:** Trigo (*Triticum aestivum*), maíz (*Zea mays*), avena (*Avena sativa*), arroz (*Oryza sativa*) (Ordás, 2023).
- **Fabaceas :** Alfalfa (*Medicago sativa*), lenteja (*Lens culinaris*), soja (*Glycine max*), frijol mungo (*Vigna radiata*), garbanzo (*Cicer arietinum*), arvejas (*Pisum sativum*) y habas (*Vicia faba*) (Molares, Ladio, & Medicine, 2012).
- **Oleaginosas:** Girasol (*Helianthus annuus*), sésamo (*Sesamum indicum*), linaza (*Linum usitatissimum*), jatrofa (*Jatropha curcas*), higuera (*Ricinus communis*) y moringa (*Moringa oleífera*) (Noda-Leyva, Pérez-Vásquez, & Valdés-Rodríguez, 2015).
- **Vegetales y condimentos:** Albahaca (*Ocimum basilicum*), mostaza (*Sinapis alba*), laurel (*Laurus nobilis*) entre otras. (Schmidt Hebbel, 1980).

2.4.2 Plántula comestible

- **Brotes (Sprouts):** Se consumen principalmente el hipocótilo (tallo embrionario) y la radícula (raíz embrionaria), junto con los cotiledones. Generalmente se cosechan en 3-7 días y se cultivan en agua o alta humedad. Ejemplo: germinado de alfalfa o lenteja.
- **Microgreens (Microverduras):** Se consumen el hipocótilo, los cotiledones y, a menudo, las primeras hojas verdaderas. Se cosechan later de 7-14 días, requieren sustrato y luz. Tienen un sabor más concentrado. Ejemplo: microgreens de rábano o brócoli.
- Para los fines de esta investigación, el término "**germinado**" se refiere específicamente a los **brotes (sprouts)** de cereales, los cuales son

cosechados en una etapa temprana (generalmente entre 5 y 10 días), donde las reservas de la semilla han sido movilizadas y la biomasa vegetal ha iniciado su desarrollo.

2.4.3 Propiedades Nutricionales y Bioactivas de los Germinados

El proceso de germinación desencadena una transformación bioquímica profunda en la semilla, que convierte a los germinados en alimentos de alta densidad nutricional, la germinación brinda al producto mayor biodisponibilidad y un crecimiento en sus componentes bioactivos (Campos-Rodriguez, Acosta-Coral, & Paucar-Menacho, 2022). Estas propiedades se pueden categorizar en:

- **Incremento en la Biodisponibilidad de Nutrientes:** La germinación reduce significativamente los antinutrientes como el ácido fítico (un quelante de minerales) y los inhibidores de enzimas (como los inhibidores de tripsina), mediante la activación de fitasas y otras enzimas hidrolíticas. Esto mejora la absorción de minerales esenciales como hierro, zinc y calcio.
- **Enriquecimiento en Vitaminas:** Se ha reportado un aumento considerable en el contenido de vitaminas hidrosolubles, especialmente del complejo B (B2, B6, ácido fólico) y vitamina C, durante el proceso de germinación. Algunos germinados, como los de trigo, son también una buena fuente de vitamina E (tocoferol), un potente antioxidante liposoluble.
- **Síntesis de Compuestos Bioactivos y Antioxidantes:** Este es el cambio más relevante desde la perspectiva de la biofortificación. La germinación actúa como un "estrés controlado" que elicit la biosíntesis de metabolitos secundarios con alta actividad antioxidante, tales como:
- **Polifenoles y Flavonoides:** Su concentración se multiplica, otorgando capacidad para neutralizar radicales libres.
- **γ -Aminobutirato (GABA):** Un aminoácido no proteico con efectos beneficiosos sobre el sistema nervioso y la presión arterial, que se acumula durante la germinación.

- **Clorofila:** En germinados cultivados con luz, se sintetiza clorofila, que también posee propiedades antioxidantes y desintoxicantes.
- **Mejora del Perfil de Aminoácidos y Digestibilidad de Proteínas:** Las proteínas de reserva (prolaminas, glutelinas) son hidrolizadas en péptidos y aminoácidos libres más fáciles de digerir. Además, suele mejorar el balance de aminoácidos esenciales, como la lisina.
- **Alta calidad de fibra dietética:** Los germinados son una buena fuente de fibra soluble e insoluble, beneficiosa para la salud gastrointestinal.

2.5 El Germinado de Trigo como Objeto de Estudio

El germinado de trigo (*wheatgrass*) es particularmente valorado en el ámbito de los alimentos funcionales. El proceso de germinación potencia enormemente su contenido de clorofila, vitaminas (A, C, E), enzimas y, como se demostrará en esta tesis, la acumulación de compuestos antioxidantes cuando se aplican elicitores como las nanopartículas de selenio. Su consumo, ya sea fresco, en jugo o deshidratado, está asociado a diversos beneficios para la salud, incluyendo actividad antioxidante, antiinflamatoria y potencialmente anticancerígena (A. Chauhan, Saxena, & Singh, 2015).

Por estas razones, el germinado de trigo se seleccionó como sistema modelo ideal para evaluar la eficacia de la biofortificación con nanopartículas de selenio y quitosano-selenio, ya que su fisiología metabólicamente activa durante la germinación es altamente receptiva a estímulos externos que modulan sus rutas bioquímicas hacia la producción de compuestos de interés nutracéutico (Ibáñez, 2022).

2.6 Principales variedades de trigo para el uso del germinado en el consumo humano

En México el trigo tiene un papel importante como uno de los granos básicos de la dieta, únicamente superado por el maíz y el frijol, colocándolo como el tercer grano de mayor importancia en el país. Los sistemas de producción del

trigo en México incluyen la modalidad de riego en invierno y bajo el esquema de temporal en el verano. La superficie sembrada bajo la modalidad de riego básicamente se enfoca en las variedades de trigo harinero (*Triticum aestivum* L.) y el trigo el cristalino (*Triticum durum* L.), mientras que en las zonas de temporal predomina la siembra de trigo harinero (Villaseñor-Mir *et al.*, 2022).

El *T. aestivum* se emplea en la industria para fabricar harina que posteriormente se transforma en pan y galletas, esta variedad se cultiva en 21 estados de México con una producción de 1,501,315 toneladas, en 2021 los principales estados productores fueron Sonora, Guanajuato, Michoacán, Sinaloa y Jalisco, sin embargo, la demanda es superior por lo que se importa trigo suave para cubrir la demanda. El trigo cristalino (*Triticum durum* L.) se utiliza en la elaboración de sémola, para la fabricación de pastas. La producción de esta variedad es excedentaria, por ello una parte de la producción se usa para la alimentación pecuaria y el resto se exporta. Se produce en 14 estados con una producción de 1,782,299 toneladas en 2021, los estados Sonora, Baja California, Guanajuato, Sinaloa y Coahuila son los principales productores (Rural, 2022, Villaseñor-Mir *et al.*, 2022).

2.7 Manejo en la producción de germinado de trigo

Los brotes son granos germinados y se producen mediante un proceso de germinación simple que en general no requiere ni luz solar ni tierra (Miyahira, Lopes, & Antunes, 2021).

Las semillas se sumergen en líquido durante el remojo, hasta que obtiene el contenido de humedad óptimo. Se descarga toda el agua adicional y se deja que la semilla germine hasta que se obtenga la humedad correcta. La germinación puede producirse en una variedad de recipientes diferentes. Un lecho de germinación, comparable a los que se utilizan en el sector de la maltería, es un recipiente tradicional. A pesar del recipiente de germinación, para mantener un porcentaje de germinación uniforme en todo el contenido, las semillas germinadas deben mantenerse en una atmósfera aeróbica con un flujo de aire constante y continuo y una temperatura alta (Ikram *et al.*, 2021).

2.8 Proceso de Germinación

2.8.1 Preparación y Aplicación del Tratamiento.

Esta fase es crucial para la validez experimental (Figura 1). La esterilización superficial de las semillas con hipoclorito de sodio o etanol acuoso elimina hongos y bacterias endófitas que podrían interferir con los resultados. El período de imbibición es la ventana crítica para la aplicación de activos, ya que es el momento de máxima absorción de agua y, por lo tanto, de la internalización de los tratamientos (Acosta *et al.*, 2025).

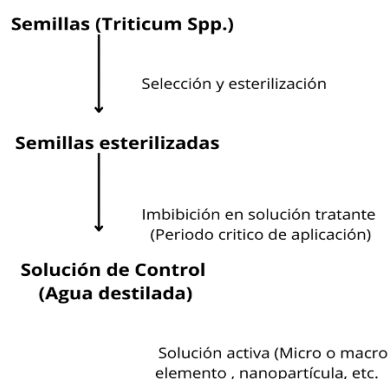


Figura 1. Preparación Experimental (Pre-tratamiento)

2.8.2 Fase de Imbibición

La primera fase en la germinación inicia cuando el agua de un medio exterior ingresa en la semilla (imbibición) (Figura 2). El tiempo de hidratación de los tejidos de la semilla, al ser un proceso físico varía en duración dependiendo de la especie. Cuando se completa la hidratación de la semilla, se van activar todos los procesos metabólicos necesarios para que se genere la germinación. Dependiendo de las condiciones ambientales, durante la etapa de la germinación la semilla puede deshidratarse retardando su estado inicial. En general, esta deshidratación no afecta negativamente a las semillas, las cuales se pueden volver a hidratar y reiniciar el proceso de germinación (Villamil & García, 1998).

Fase 1: Imbibición

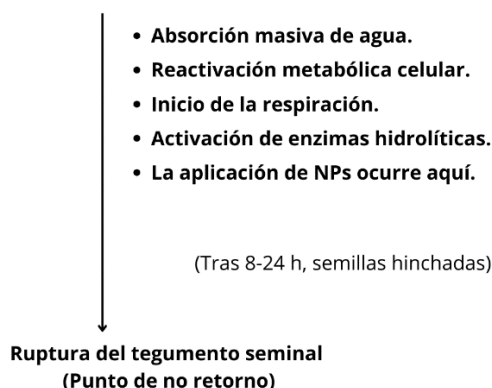


Figura 2. Fase de Imbibición

2.8.3 Fase de germinación

Con la semilla hidratada adecuadamente, comienza la segunda fase del proceso de germinación, que se distingue, porque produce una disminución en la absorción de agua por las semillas (Figura 3). Durante esta etapa tiene lugar una activación generalizada del metabolismo de la semilla, lo cual es esencial para el desarrollo de la última fase del proceso, la fase de crecimiento (Villamil & García, 1998).

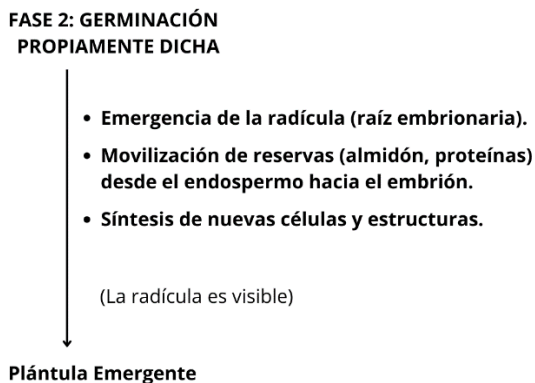


Figura 3. Fase de germinación

2.8.4 Fase de crecimiento

Una vez que se ha alcanzado la etapa de crecimiento, se aumenta la actividad metabólica que genera que la radícula emerja por medio de las cubiertas seminales (Figura 4). Esta etapa es crucial ya que, una vez iniciado el

crecimiento la semilla no puede volver a etapas anteriores y en el caso de que las condiciones del medio no sean las favorables para que esta fase continúe, la semilla morirá. El desarrollo de la plántula inicia cuando la radícula rompe la cubierta de la semilla, en este momento se requiere de un elevado gasto de energía que se obtiene mediante la movilización de las reservas nutritivas de la semilla (Villamil & García, 1998).

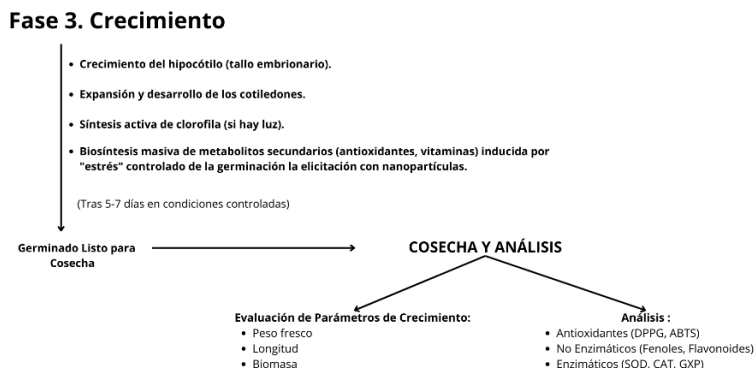


Figura 4. Fase de crecimiento

2.9 Consumo de germinados

Los germinados son un producto agrícola de suma importancia en la alimentación sana y en los últimos años han tenido éxito debido a que aportan gran cantidad de nutrientes necesarios para una alimentación balanceada, siendo de los pocos alimentos que ingerimos cuando aún están vivos, lo que incrementa enormemente su valor nutricional. Los germinados son más fáciles de digerir que los granos (Pérez Galeano & Zapata Valencia, 2015).

2.9.1 Consumo de germinados en Humanos

El consumo regular de germinados está asociado a una amplia gama de beneficios para la salud (Figura 5), avalados por la literatura científica (H.-Y. Liu *et al.*, 2022).

- **Alta densidad nutricional:** Son una fuente concentrada de vitaminas (A, C, E, K, complejo B), minerales (hierro, zinc, calcio, magnesio, potasio), enzimas, clorofila y antioxidantes, con un muy bajo aporte calórico.
- **Mejora de la digestión:** Las enzimas digestivas (amilasas, proteasas) presentes facilitan la descomposición de los alimentos, alivian la carga del páncreas y regeneran la flora intestinal. Su alto contenido en fibra combate el estreñimiento.
- **Salud cardiovascular:** El alto contenido de potasio ayuda a regular la presión arterial. Las saponinas (presentes en germinados como la alfalfa) ayudan a reducir los niveles de colesterol en sangre.
- **Fortalecimiento del sistema inmunológico:** Su combinación de antioxidantes, vitaminas, minerales y enzimas potencia las defensas del organismo y tiene efectos rejuvenecedores y reconstituyentes.
- **Control de azúcar en sangre:** Ayudan a controlar los niveles de glucosa en sangre, siendo un alimento beneficioso para personas con diabetes o resistencia a la insulina.
- **Propiedades desintoxicantes:** La clorofila es un excelente depurador de la sangre, ayuda a frenar infecciones y equilibra el balance ácido-alcalino del organismo.
- **Alivio de síntomas menopáusicos:** Por su riqueza en **fitoestrógenos**, se aconseja su consumo en mujeres que atraviesan la menopausia para regular los desequilibrios hormonales.

- **Potencial anticancerígeno:** Investigaciones relacionan los germinados de brócoli y coles con la prevención del cáncer, especialmente el de colon y estómago, gracias a su contenido en sulforafano, una sustancia con propiedades antimicrobiales y anticarcinogénicas. Los fitatos remanentes también han demostrado tener efectos anticancerígenos.

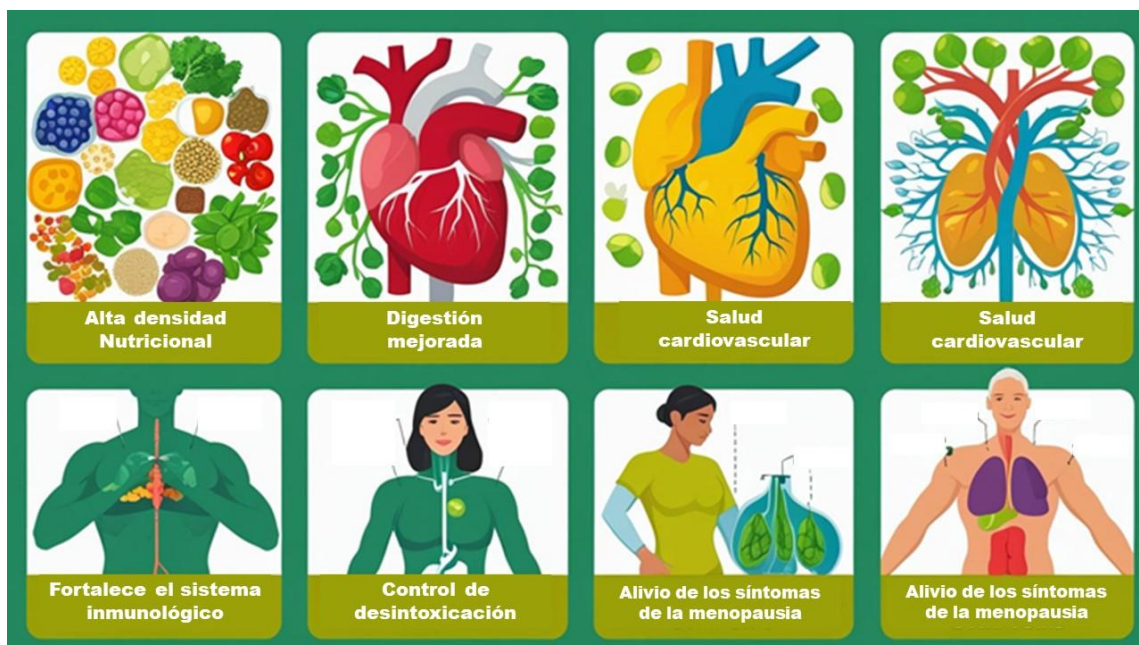


Figura 5. Beneficio de consumo de germinados en Humanos

2.9.2 Consumo de germinados en Animales

El proceso de germinación modifica favorablemente la composición bioquímica de la semilla, lo que se traduce en ventajas tangibles para la nutrición animal (Figura 6):

- **Reducción de Antinutrientes:** La actividad enzimática (fitasas, α -amilasas, proteasas) durante la germinación degrada eficazmente factores antinutricionales como el ácido fítico (quelante de minerales), los inhibidores de tripsina (que afectan la digestibilidad proteica) y los taninos (que precipitan proteínas). Esto mejora la biodisponibilidad de

nutrientes críticos como fósforo, calcio, zinc y proteínas (Valencia, Ronayne de Ferrerl, & Martín de Portela, 2013).

- **Incremento en la Digestibilidad:** La pre-digestión enzimática de macromoléculas complejas (almidón, proteínas de reserva) convierte los polisacáridos en azúcares simples y las proteínas en péptidos y aminoácidos libres. Esto resulta en un alimento de más fácil asimilación, lo que es particularmente beneficioso para animales jóvenes o con sistemas digestivos sensibles.
- **Enriquecimiento en Vitaminas y Enzimas:** Se reporta un aumento significativo en la concentración de vitaminas hidrosolubles (Complejo B, Vitamina C) y liposolubles (Vitamina E). Además, las propias enzimas presentes en el germinado (amilasas, proteasas) pueden contribuir a los procesos digestivos del animal, mejorando la utilización del alimento total de la ración.
- **Presencia de Compuestos Bioactivos:** Los germinados acumulan metabolitos secundarios como clorofila, polifenoles y γ -aminobutirato (GABA), los cuales poseen propiedades antioxidantes, antiinflamatorias y promotoras del bienestar general del animal.



Figura 6. Beneficio del consumo de germinados en Animales

2.10 Riesgos microbiológicos de los germinados

Durante la etapa de germinación la humedad y la temperatura son factores necesarios para que este proceso se lleve a cabo, sin embargo, estas condiciones favorecen el desarrollo de microorganismos indeseables tanto a nivel

doméstico como industrial, por eso es de suma importancia que se mantenga una excelente higiene de las semillas y del agua que se utiliza en la germinación. En el año 2003 se publicó el Código de Prácticas de Higiene para las Frutas y Hortalizas Frescas, en este documento se encuentran las recomendaciones para que la producción de germinados destinados al consumo humano sean inocuas, es importante realizar controles microbiológicos en las semillas y en el agua utilizada para la germinación principalmente de *Salmonella spp.*, *Escherichia coli*, *Listeria monocytogenes* y *Shigella spp.* También se recomienda la aplicación de las Buenas Prácticas de Almacenamiento (BPA) y las Buenas Prácticas de Higiene (BPH) de las semillas durante la producción, adaptación y almacenamiento (Ponce de Leon, Isasa, González, & García, 2023).

2.11 Control de calidad de los germinados

Las semillas germinadas se desarrollan mediante un proceso de germinación controlado y supervisado por el productor para entregar el producto adecuado, lote tras lote. Como la germinación es un proceso complicado, es fundamental comprender la aparición de los granos y cómo se modifica el método en función de los tipos de semillas y condiciones de cultivo para producir un producto de mayor calidad. Durante muchos años, los granos germinados se han considerado generalmente como una semilla con un radical visible o como un alimento basado en la creencia común de que ofrecen ventajas esenciales en términos de nutrición, sabor y textura en comparación con sus equivalentes de granos no germinados. En las últimas décadas, la germinación también se ha investigado como una posible técnica de ingeniería de alimentos verdes para mejorar el perfil nutritivo de los granos y también para analizar metabolitos secundarios con diversos usos en las industrias nutracéutica, de alimentos funcionales, farmacéutica y cosmética. En la evaluación de las ventajas de las semillas germinadas, se deben considerar dos factores y cómo difieren las ventajas entre las investigaciones y los registros, como (a) cómo los métodos de producción contribuyen a las variaciones y (b) cuánto más varía la estructura genética del material precursor (Ikram *et al.*, 2021).

2.12 Uso de promotores para germinación

Los microorganismos promotores de crecimiento vegetal, conocidos como PGPM (*Plant Growth-Promoting Microorganism*), es una de las alternativas para optimizar los cultivos mediante productos biológicos o biofertilizantes. Se busca la integración al sistema productivo de organismos seleccionados por sus funciones benéficas en distintos procesos, por ejemplo, los propios microorganismos de la rizosfera, que influyen en el desarrollo radicular, fijan el nitrógeno, solubilizan el P del suelo, producen ácidos orgánicos y otros metabolitos secundarios generando una mayor disponibilidad de nutrientes, que indirectamente influyen en las fitohormonas y estimulan el crecimiento vegetal. Otro ejemplo son las *Pseudomonas fluorescens* que producen antibióticos que evitan que la planta sea atacada por otras bacterias y/o hongos patógenos (Leal-Almanza *et al.*, 2018).

2.13 Uso de elicitores para germinación

Los elicitores son relativamente nuevos y continúan en investigación, se ha presentado como una alternativa en la agricultura sostenible ante los agroquímicos utilizados en la producción de alimentos. Los elicitores se describen como estimulantes del estrés en las plantas, aplicados en pequeñas cantidades generan una respuesta de defensa por medio de la producción de metabolitos secundarios generando una capacidad de adaptación. Existen distintos tipos de elicitores, todos influyen en el crecimiento, desarrollo y expresión genética de las plantas. (Caicedo-Lopez *et al.*, 2021).

2.14 Biofortificación en cultivos

La biofortificación, es una metodología que tiene muchos años de investigación, pero en las últimas décadas se le ha considerado uno de los métodos más baratos, rápidos y naturales que contribuyen a mantener una alta calidad de los alimentos. La biofortificación es un excelente método para proporcionar la cantidad necesaria de micronutrientes, para producir los llamados alimentos funcionales. (Radawiec *et al.*, 2021). Existen diferentes procedimientos para el aumento de la densidad de las vitaminas y minerales en las partes

comestibles de los cultivos, o reducir los anti nutrientes, mejorando de esta manera la calidad nutricional en los alimentos. Existen tres métodos principalmente asociados a la biofortificación (ACH, 2022).:

- A) biofortificación convencional. Utiliza técnicas de cultivo convencionales, el desarrollo de nuevas variedades de plantas mediante el uso de la selección natural mejorando las características genéticas de una variedad de cultivo determinada. Se pretende manipular el genoma de la planta dentro de los límites naturales de la especie.
- B) biofortificación agronómica. Se efectúa mediante la fertilización directa del suelo con minerales esenciales, o mediante la pulverización de nutrientes en la hoja de los cultivos.
- C) Ingeniería genética. Método de biofortificación que pretende introducir genes deseados y relacionados con rasgos densos de micronutrientes, en un código genético huésped, para así modificarlos mediante nuevas técnicas de ingeniería genética.

Algunos promotores de la biofortificación consideran crucial enfocarse en el código genético para incrementar los nutrientes esenciales, en un camino prometedor para eliminar las deficiencias de micronutrientes en los países en vías de desarrollo. Otros consideran que se trata de una solución falsa, peligrosa, cara y a corto plazo (ACH, 2022).

2.14.2 Biofortificación con selenio

El selenio (Se) es un elemento metaloide o no metálico de origen natural considerado un micronutriente esencial para los seres humanos y otros organismos vivos (Ali *et al.*, 2023). Su número atómico es el 34 y se encuentra en el grupo 16 y período 4 del sistema periódico de elementos químicos de DI Mendeleev. y está clasificado como un elemento calcógeno (Mikhailova, 2023).

El selenio es un nutriente necesario e importante para la salud humana. La deficiencia de selenio es motivo de preocupación en todo el mundo porque

conduce a la aparición de trastornos de la tiroides, enfermedades virales graves, enfermedades circulatorias, inflamaciones y cáncer. El contenido medio de selenio en el horizonte superficial de los suelos de todo el mundo oscila entre menos de $0.1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ y $100 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Sin embargo, la mayoría de ellos contienen aproximadamente entre 0.1 y $0.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ de selenio. En los países con déficit de selenio, un aumento de su contenido en alimentos de origen vegetal mediante la implementación de métodos adecuados de introducción de selenio podría aumentar la ingesta diaria de alimentos ricos en Se, y por lo tanto paliar los efectos negativos del déficit de este elemento. Por ejemplo, en 1984 en Finlandia, debido a la baja ingesta de selenio, se emitió una orden oficial para enriquecer los fertilizantes compuestos con selenato de sodio. Esta medida contribuyó a un aumento del contenido de selenio en los alimentos, y por lo tanto a un mayor consumo de selenio por parte de los ciudadanos (Radawiec, Szulc, & Rutkowska, 2021).

El impacto de la deficiencia de selenio y la falta de optimización en las condiciones globales son difíciles de evaluar, pero debido a la alta incidencia de este fenómeno, dará lugar a diversos tipos de cáncer, enfermedades cardiovasculares y enfermedades virales. Su contenido en alimentos de origen vegetal suele reflejar el contenido del elemento en el suelo en áreas que estaban bajo cultivo. Los alimentos muestran contenidos variables de selenio porque el contenido del elemento en el suelo es desigual en términos de su distribución y disponibilidad para las plantas. En los alimentos de origen vegetal, los cereales son la principal fuente de selenio en la mayoría de los países del mundo. Junto con el arroz, el trigo domina la producción mundial de cereales y es la fuente básica de selenio en la dieta humana en la mayoría de los países del mundo. Por estas razones, es la mejor planta para ser utilizada en el proceso de biofortificación (Radawiec *et al.*, 2021).

2.15 Nanopartículas

La bionanotecnología permite la aplicación a escala nanométrica (0-10 nm) (Bello-Bello & Spinoso-Castillo, 2023). Las nanopartículas (NPs) son materiales que miden entre 1 a 100 nm (Figura 7) y han tomado un realce en los últimos años (Aguillón Bárcenas, Duarte Velázquez, Caudillo Yebra, & Cruz Jiménez, 2022). Se han descrito diversos usos de las NPs, en la agronomía principalmente se han utilizado para estimular la germinación, aumentar el rendimiento de los cultivos y promover el desarrollo de los cultivos *in vitro*, uno de los obstáculos de esta tecnología es que se debe evaluar la citotoxicidad en distintos organismos, así como las afectaciones a microorganismos benéficos en el ambiente, por la tanto es importante para cada tipo de estudio evaluar la concentración de las NPs (Bello-Bello & Spinoso-Castillo, 2023).

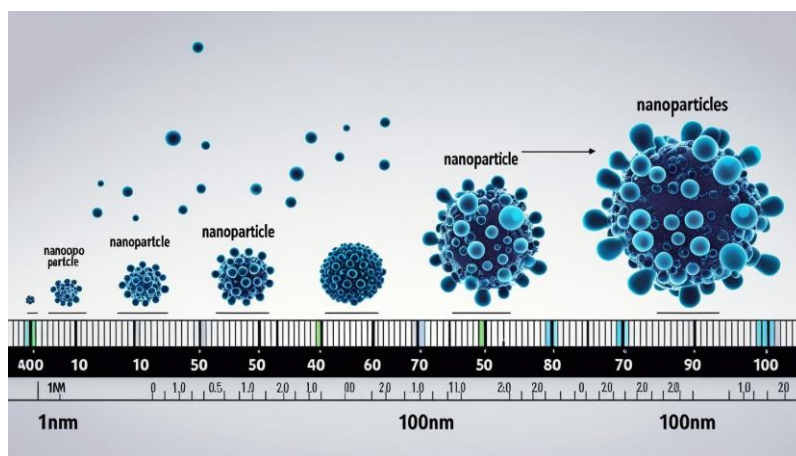


Figura 7. Escala de Nanopartículas (1 -100 nm)

2.15.1 Nanopartículas de Selenio

La creación de nanopartículas mediante métodos biológicos ha provocado un verdadero auge en este campo de la nanotecnología en las últimas décadas. La síntesis ecológica, que no requiere altos costos de energía ni el uso de sustancias peligrosas y tóxicas, tiene otras ventajas innegables en comparación con los métodos físicos y químicos para producir nanopartículas. La aplicación de sustratos biológicos (bacterias, hongos, algas y plantas) como matriz para la síntesis y empaquetamiento de NP permite la producción de un número inconmensurable de variantes, cada una con sus propias propiedades, a veces

únicas, proporcionadas por la propia naturaleza y el organismo donde tiene lugar el proceso. La baja toxicidad, la biodegradabilidad y la biocompatibilidad son los parámetros clave de la reputación positiva de la bionanopartícula. Las nanopartículas metálicas son uno de los objetos más populares en la síntesis verde, y el número de artículos sobre este tema crece constantemente de año en año. Entre las NP no metálicas, se está prestando especial atención a las nanopartículas de selenio. La biosíntesis de SeNP es un proceso simple, de un solo paso, que no requiere productos químicos tóxicos, altas temperaturas o equipos complejos (Mikhailova, 2023).

2.15.2 Nanopartículas de selenio en plantas

Uno de los principales problemas de la aplicación de Se en las plantas para estimular su crecimiento, es que cuando se utiliza en concentraciones elevadas se pueden producir síntomas de fitotoxicidad, como retardo en el crecimiento, clorosis, marchitez y hojas quebradizas, disminución en la síntesis de proteínas, estrés oxidativo y muerte prematura de la planta. Es importante mencionar que el efecto del Se está en función de la estructura química, de la concentración aplicada, el tipo de planta y capacidad de absorción en sus tejidos.

Una de las alternativas para disminuir los efectos tóxicos del Se, es utilizar nanopartículas de Se (SeNPs). Debido a su tamaño las SeNPs presentan mejores propiedades fisicoquímicas y biológicas, se absorben hasta 20 veces más rápido por la planta, además de alta degradabilidad, solubilidad, multifuncionalidad y su relación superficie-volumen. En la agricultura, las SeNPs pueden ser utilizadas como bioestimulantes durante todo el ciclo del cultivo, por medio de aspersiones foliares o a través de su aplicación a la raíz. Entre sus beneficios se describen el desarrollo de las plantas, incrementan la disponibilidad y la absorción de nutrientes del suelo, mejoran la calidad del fruto, elevan la tolerancia a diferentes factores de estrés biótico y abiótico. Además, se han utilizado como nanopesticidas para controlar diversas enfermedades principalmente causadas por hongos, levaduras, bacterias entre otros (García, 2023).

2.15.3 Nanopartículas de selenio en personas

El consumo habitual de una dieta subóptima en selenio conduce a una reducción del estado de selenio, lo cual se asocia con una variedad de resultados adversos para la salud, incluidos trastornos cardiovasculares, deterioro de la función inmunitaria y algunas formas de cáncer. La diversificación de la dieta es una opción atractiva en términos de ingesta general de proteínas, minerales y vitaminas. Sin embargo, el acceso a dietas diversas no es posible en muchos contextos socioeconómicos (Chilimba *et al.*, 2012).

2.16 Quitosano

Es un aminopolisacárido lineal que se obtiene de la quitina, el segundo polímero natural más abundante después de la celulosa, este compuesto se encuentra en la mayoría de los artrópodos en su exoesqueleto como en insectos arácnidos y crustáceos, así como en la pared celular de algunas algas y hongos. El quitosano, se sintetiza a raíz de la desacetilización alcalina total o parcial de la quitina, eliminándose el grupo acetilo de los monómeros de N-acetilglucosamina, quedando ésta transformada en glucosamina (Laiz, Martín-Ramos, Casado, & Martín-Gil, 2017).

2.16.1 Quitosan en la agricultura

El quitosano también actúa como un agente repelente de plagas. Al modificar la estructura de la cutícula de insectos y otros artrópodos, dificulta su alimentación y reproducción, ayudando a mantener las poblaciones de plagas bajo control sin recurrir a productos químicos agresivos. Esto permite la generación de alternativas naturales a pesticidas químicos que no solo controlan las plagas, sino que también mejoran la salud del suelo y la biodiversidad (Nutriterra, 2024).

2.16.2 Características del quitosano

Las propiedades principales que determinan la eficacia y el alcance de las aplicaciones del quitosano incluyen el tamaño de partícula, el peso molecular, la estructura cristalina, el nivel de desacetilación y el área de superficie. La cristalinidad, una propiedad del quitosano, refleja la proporción de las fracciones

cristalinas y amorfas del biopolímero. Esta propiedad se mide por el índice de cristalinidad (CI). El quitosano es un biopolímero polimórfico y es semicristalino en su forma sólida. Tiene una celda unitaria ortorrómbica con dos cadenas antiparalelas sin moléculas de agua. El área superficial y el tamaño de las partículas son dos de las características más cruciales del quitosano. La porosidad del quitosano está relacionada con la distribución del tamaño de los poros y el volumen de sus poros, que a su vez dependen de la fuente y el proceso de extracción (Román-Doval, Torres-Arellanes, Tenorio-Barajas, Gómez-Sánchez, & Valencia-Lazcano, 2023).

2.16.3 Quitosano en plantas

El quitosano es utilizado en fertilizantes y bioestimulantes para mejorar el crecimiento y desarrollo de las plantas. Al promover la síntesis de fitohormonas como auxinas y giberelinas, el quitosano contribuye a un mayor crecimiento de raíces y una mejor absorción de nutrientes. Estudios demuestran que el uso de quitosano puede incrementar el rendimiento de los cultivos. Al mejorar la salud general de las plantas y su resistencia a factores de estrés, y por otro lado, mejora de manera indirecta al estimular su sistema radicular (Nutriterra, 2024).

2.17 Compuestos bioactivos

Los beneficios en la Salud consumiendo alimentos de origen vegetal y alimentos ricos en lípidos parecen estar relacionados con la presencia de un gran número de sustancias pertenecientes al grupo de los denominados compuestos bioactivos que son sustancias químicas presentes en pequeñas cantidades en productos de origen vegetal y en alimentos ricos en lípidos. No obstante, se ha indicado que los péptidos son considerados también compuestos bioactivos que provienen de proteínas de distintos alimentos (Gamez-Villazana, 2022).

2.18 Radicales libres

Los radicales libres son especies químicas que en su estructura atómica presentan un electrón desapareado y que pueden estar cargadas o no, esta estructura espacial le produce una alta inestabilidad. Poseen una estructura birradicálica, son muy reactivos, tienen una vida media corta, por lo que actúan

cerca al sitio en que se crean y son difíciles de dosificar. Molecularmente los radicales libres son pequeñas moléculas ubicuitarias y difusibles que se producen por distintos mecanismos, principalmente en la cadena respiratoria mitocondrial, la cadena de transporte de electrones a nivel microsomal, los cloroplastos y las reacciones de oxidación. Los radicales libres del oxígeno poseen una función fisiológica en el organismo ya que participan en la fagocitosis, favorecen la síntesis de colágeno, la síntesis de prostaglandinas, estimulan enzimas de la membrana celular, disminuyen la síntesis de catecolaminas por las glándulas suprarrenales, cambian la biomembrana y ayudan la quimiotaxis. También generan daño celular (oxidativo), al interactuar con las principales biomoléculas del organismo (Venereo Gutiérrez, 2002).

2.19 Antioxidantes

Un antioxidante se define como una molécula que puede retrasar o impedir la oxidación, la actividad antioxidante se puede determinar por diferentes métodos y se basan en la capacidad que tiene una molécula para captar radicales libres. Existen compuestos enzimáticos que actúan como defensa antioxidante, como lo son el superóxido dismutasa, catalasa, glutatión y peroxidasa, también existen otros que no son enzimáticos como la vitamina E, beta-caroteno, vitamina C, glutatión reducido, albumina, flavonoides y metales de transición como Se, Cu, Zn, entre otros (Castañeda Castañeda, Ramos Llica, & Ibáñez Vasquez, 2008).

2.20 Compuestos fenilpropanoides

Los fenilpropanoides son un grupo diverso de compuestos derivados del esqueleto carbonado de la fenilalanina que participan en la defensa, el soporte estructural y la supervivencia de las plantas (Vogt, 2010). La vía de los fenilpropanoides es específica de las plantas y proporciona una gran variedad de moléculas que tienen funciones importantes (La Camera *et al.*, 2004). Los fenilpropanoides contribuyen a todos los aspectos de las respuestas de las plantas a los estímulos bióticos y abióticos (Vogt, 2010).

2.20.1 Compuestos Fenólicos

Los compuestos fenólicos son metabolitos secundarios derivados de las vías de las pentosas fosfato, shikimato y fenilpropanoide en las plantas. Estos compuestos, uno de los grupos de fitoquímicos más abundantes, tienen una importancia fisiológica y morfológica considerable en las plantas. Los compuestos fenólicos se han asociado con los beneficios para la salud derivados del consumo de grandes cantidades de frutas y verduras. Los compuestos fenólicos podrían ser un determinante importante del potencial antioxidante de los alimentos y por lo tanto podrían ser una fuente natural de antioxidantes (Balasundram, Sundram, & Samman, 2006).

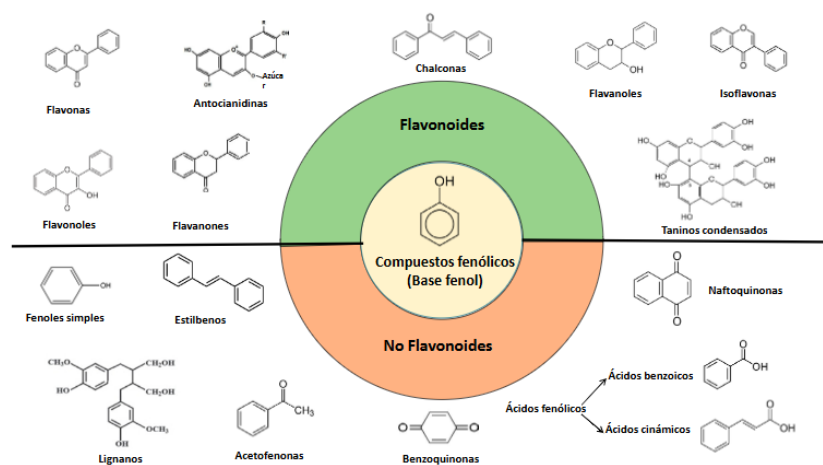


Figura 8. Esquema de compuestos fenólicos (Recuperado de (Perez-Perez et al., 2018)).

2.20.2 Compuestos Flavonoides

Los vegetales presentan mecanismos de protección contra la polución ambiental y los rayos ultravioleta, uno de estos mecanismos son los pigmentos naturales como los flavonoides. Los flavonoides contienen en su estructura química un número variable de grupos hidroxilo fenólicos y excelentes propiedades de quelación del hierro y otros metales de transición, lo que les confiere una gran capacidad antioxidante. El ser humano no produce flavonoides por lo que se obtienen mediante el consumo de plantas, frutas, verduras y en distintas bebidas, los flavonoides son importantes en la dieta humana como componentes no energéticos.

Las propiedades antioxidantes de los flavonoides se centran en los radicales hidroxilo y superóxido, especies altamente reactivas implicadas en el inicio de la cadena de peroxidación lipídica. Se ha descrito que tienen efectos terapéuticos en un alto número de patologías, incluyendo la cardiopatía isquémica, la aterosclerosis o el cáncer, además de su capacidad de modificar la síntesis de eicosanoides con respuestas anti-prostanoide y anti-inflamatoria, de prevenir la agregación plaquetaria (efectos antitrombóticos) y de proteger a las lipoproteínas de baja densidad de la oxidación (Martínez-Flórez, González-Gallego, Culebras, & Tuñón, 2002).

2.21 Vitamina C

La vitamina C se conoce como ácido L-ascórbico, ya que se observó que era el factor necesario para el tratamiento del escorbuto (del latín *scorbutus*, de ahí “a-scorbutus”). Como ya se utilizaban los términos “vitamina A liposoluble” y “vitamina B hidrosoluble”, se acuñó el término vitamina C. En general, el término también incluye su forma oxidada, el ácido L-deshidroascórbico, que puede convertirse fácilmente en ácido L-ascórbico en el cuerpo humano. A diferencia de muchas otras vitaminas, el contenido de vitamina C en diversos alimentos es, en general, relativamente alto (10–100 mg 100 g⁻¹), y, en algunos casos, alcanza unidades de gramos por 100 g de peso fresco. Esto posiblemente esté relacionado con el hecho de que la vitamina C se forma a partir de azúcares, que son compuestos comunes en diferentes organismos. En las plantas, el ácido L-ascórbico es responsable de tres funciones principales: un cofactor enzimático, un eliminador de radicales y un donador/aceptor en el transporte de electrones ya sea en la membrana plasmática o en los cloroplastos, además de otras funciones menores. Actualmente, la mayor parte de la ingesta diaria de vitamina C proviene de frutas y verduras, que, en muchos países, a diferencia del pasado, están disponibles durante todo el año (Doseděl *et al.*, 2021).

2.22 Importancia de la actividad enzimática

Se refiere a la velocidad con la que una enzima transforma un sustrato en producto. Esta actividad depende en gran medida de las condiciones de la

reacción, donde incluyen la temperatura, pH, concentración de la enzima y del sustrato. La temperatura influye en la actividad enzimática, a bajas temperaturas la mayoría de las enzimas muestran poca actividad, mientras que, a temperaturas más altas, la actividad enzimática aumenta, ya que las moléculas tienen más movimiento generando más colisiones entre enzimas. El pH también influye en la actividad enzimática, si un valor de pH está arriba o abajo del pH óptimo, se modifican las interacciones de los grupos R, lo que destruye la estructura terciaria y el sitio activo. Como resultado, la enzima ya no puede unirse a un sustrato de manera correcta y no ocurren reacciones. Si se revierte un pequeño cambio en el pH, una enzima puede recuperar su estructura y actividad. Sin embargo, altas variaciones respecto del pH óptimo destruyen de manera permanente la estructura de la enzima (Timberlake, 2013).

2.22.2 Enzimas en las plantas

Naturalmente, las plantas prescinden de los estreses bióticos, incluidas las plagas, los parásitos y los patógenos, que son el mayor obstáculo para el rendimiento y la distribución de los cultivos. Las plantas establecen vías de respuesta inmune complejas que actúan como organismos ventilados que pueden soportar una combinación de estreses, no tienen una respuesta inmune, por lo tanto no son capaces de adaptarse a nuevos patógenos (Appu, Ramalingam, Sathiyarayanan, & Huang, 2021).

2.22.3 Glutación

De Rey-Pailhade descubrió por primera vez el glutatión en 1888 a partir de extractos de levadura, claras de huevo y muchos otros tejidos animales. Debido al descubrimiento de las funciones del glutatión en los fluidos corporales humanos, los estudios sobre su estructura y funciones comenzaron ampliamente en la década de 1960. Al mismo tiempo, su metabolismo fue confirmado en 1983 por el Dr. Alton Meister. Las funciones del glutatión (GSH) como regulador del crecimiento de las plantas junto con sus estructuras y metabolismo se detallan en las secciones siguientes. El GSH, un tiol de bajo peso molecular se encuentra de forma innata y abundante en los tejidos vegetales, típicamente presente en

concentraciones milimolares. Generalmente, el GSH se encuentra en las raíces y hojas de las plantas, con las concentraciones más altas principalmente en las mitocondrias, seguidas por los núcleos, peroxisomas, citosol, plástidos y concentraciones traza encontradas en cloroplastos y vacuolas (Koh *et al.*, 2021).

2.22.4 Catalasa y Peroxidasa

Las catalasas y peroxidasas son enzimas oxidorreductasas que se encuentran en casi todos los organismos que respiran aeróbicamente. Desempeñan un papel protector crucial en la prevención del daño oxidativo de los componentes celulares causado por el peróxido de hidrógeno (H_2O_2), un subproducto del metabolismo aeróbico esencial, así como sus productos de descomposición altamente reactivos (Campomanes, Rothlisberger, Alfonso-Prieto, & Rovira, 2015).

2.22.5 Superóxido dismutasa (SOD)

La amenaza del estrés oxidativo para el organismo es tan grande que se han desarrollado en las células una serie de defensas antioxidantes y sistemas de reparación para ayudar a protegerse contra la destrucción de los radicales libres. Estas defensas incluyen las enzimas de la superóxido dismutasa (SOD; se encuentran isoformas separadas en el citosol, las mitocondrias y el espacio extracelular) junto con la catalasa y el peróxido de glutatión que desintoxican los radicales superóxido, el peróxido de hidrógeno y los hidroperóxidos lipídicos respectivamente (Wickens, 2001).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Ubicación del experimento y material vegetal

El estudio se realizó en el laboratorio de Biotecnología de la Universidad Politécnica de Gómez Palacio, ubicada en la ciudad de Gómez Palacio, Durango (25°34'11.5" N, 103°29'53.5" O), a una altitud de 1120 msnm. Se utilizaron semillas de trigo (*Triticum spp.* - Sprouts - Nature Jim's ®) de tamaño uniforme, que fueron desinfectadas con etanol al 75% durante 5 minutos y luego lavadas cuatro veces con agua destilada (Li *et al.*, 2019).

3.2 Síntesis de nanopartículas de selenio

3.2.1 Recolección y procesamiento de material vegetal

Se utilizaron frutos de granada (*Punica granatum* L.) cosechados en el ciclo primavera-verano de 2023 en el área local, los frutos se lavaron exhaustivamente con agua desionizada para eliminar impurezas superficiales, se pelaron manualmente y se desgranaron para obtener los arilos. Estos se sometieron a secado en estufa a 40 °C durante 4 días hasta alcanzar peso constante. El material seco se molió en un molino de cuchillas (TecnoCientifica, HBC®) hasta obtener un polvo homogéneo (< 500 µm).

Para la preparación del extracto acuoso, se suspendieron 20 g de polvo en 100 mL de agua desionizada estéril (grado ACS), obteniendo una concentración del 20% (p/v). La mezcla se sonicó durante 5 minutos (Hielscher Ultrasonic, UIP400MIP®, para facilitar la liberación de compuestos bioactivos y posteriormente se incubó a 38 °C con agitación constante (150 rpm) durante 96 horas en un incubador orbital (Biolab, IKA®). El extracto se filtró en dos etapas: primero con papel de filtro Whatman No. 1 y luego mediante filtración al vacío con membrana de 0.45 µm para eliminar partículas residuales. El filtrado se almacenó a -20 °C en viales estériles hasta su uso en experimentos de síntesis de nanopartículas. Las nanSe obtenidas presentaron forma semiesférica en un rango de tamaño de partícula de 5 a 25 nm.

3.2.2 Optimización de procesos y biosíntesis de nanSe

Las nanopartículas de selenio (nanSe) se sintetizaron mediante un método de síntesis verde basado en la metodología descrita por (Bhavyasree & T S, 2021). Con modificaciones específicas. Brevemente, se agregaron 10 mL de extracto acuoso de *Punica granatum* (20% p/v) gota a gota a 90 mL de una solución de selenito de sodio (Na_2SeO_3 , 10 mM) bajo agitación constante (150 rpm). La mezcla reaccionante se mantuvo en completa oscuridad a temperatura ambiente ($25 \pm 2^\circ\text{C}$) durante 24 h en un agitador orbital (Biolab®, IKA) para evitar la fotodegradación y garantizar una reducción homogénea de los iones de selenio.

Posteriormente, la solución se centrifugó a $10,000 \times g$ durante 10 min (centrífuga ICB®, CDY101797) para precipitar las nanSe. Los residuos orgánicos obtenido se lavó tres veces con agua destilada estéril para eliminar impurezas y biomoléculas no adsorbidas. Finalmente, las nanSe se secaron a 35°C en estufa hasta peso constante y se molieron en un mortero de ágata para obtener un polvo homogéneo. La Figura 9 muestra un esquema detallado del proceso de biosíntesis.



Figura 9. Biosíntesis de nanSe

3.2.3 Caracterización morfológica y fisicoquímica

Las propiedades estructurales, morfológicas y vibracionales de las nanSe biosintetizadas se analizaron mediante técnicas espectroscópicas y de difracción. La espectroscopia UV-Vis (espectrofotómetro UV-3600, Shimadzu) se empleó para confirmar la formación de nanSe, registrando absorbancias en el rango de 200–800 nm. La presencia de un pico de absorción entre 250–300 nm indicó la reducción exitosa de iones Se^{4+} a Se^0 .

La espectroscopia de infrarrojo por transformada de Fourier (FT-IR) (Nicolet iS50, Thermo Scientific) se utilizó para identificar grupos funcionales presentes en la superficie de las nanopartículas. Los espectros se adquirieron en el rango de 400–4000 cm^{-1} con una resolución de 4 cm^{-1} , revelando la participación de grupos hidroxilo, carboxilo y fenólicos del extracto de *Punica granatum* en la reducción y estabilización de las nanSe.

La difracción de rayos X (XRD) (difractómetro Bruker D8 Advance) permitió determinar la estructura cristalina de las nanopartículas. Los análisis se realizaron con radiación Cu-K α ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$), un voltaje de 40 kV y una corriente de 30 mA, escaneando ángulos 2θ entre 10° y 80° . Los patrones de difracción mostraron picos característicos correspondientes a la estructura cristalina trigonal del selenio elemental (Se^0), confirmando la ausencia de fases amorfas o impurezas.

Todos los protocolos experimentales siguieron las especificaciones operativas reportadas previamente por (Hano & Abbasi, 2022), con adaptaciones menores para garantizar la reproducibilidad de los resultados.

3.3 Ensayo de germinación y medición del crecimiento

Las semillas fueron distribuidas en catorce tratamientos, cada uno compuesto por diez semillas Tabla 1, bajo la metodología de (Ramírez Rodríguez *et al.*, 2021). Los tratamientos se aplicaron por cebado una sola vez a las semillas durante la etapa de imbibición, sumergiéndolas en las soluciones correspondientes durante 8 horas en oscuridad.

Tabla 1. Tratamientos establecidos con nanopartículas de selenio (nanSe) y quitosano-selenio (nanSe-CS).

Tratamiento	Concentración (mg mL ⁻¹)
Control	Agua destilada
CS	50 (quitosano)
Na ₂ SeO ₃	0.10, 0.50, 1.00, 1.5, 2.0 y 2.50 (selenito)
nanSe-CS	0.10-50, 0.50-50, 1.00-50, 1.5-50, 2.0-50 y 2.50-50 (nanSe-CS)

3.4 Proceso de germinación

Se colocaron diez semillas por cajas de Petri (200 mm diámetro) con papel filtro Whatman® grado 1, humedecido con 5 mL de agua destilada. Las cajas se incubaron (25±2°C, 60% HR, fotoperiodo 12/12 h) en cámaras HGZ-150®. La germinación se monitoreó diariamente (7 días), considerando como criterio de éxito la emergencia del germen ≥50 % de la longitud seminal (ISTA, 2024; Li et al., 2019).

Durante siete días se registraron los parámetros de crecimiento, siguiendo los lineamientos de la Asociación Internacional de Pruebas de Semillas (ISTA). Diariamente se calculó la germinación de las semillas y la germinación de la semilla se examinó cuando la longitud del germen alcanzó la mitad de la longitud de la semilla (Faraji, Sepehri, & Salcedo-Reyes, 2018).

3.5 Parámetros evaluados en el bioensayo

3.5.1 Porcentaje de germinación (G%)

Siete días después de la siembra se evaluó el porcentaje de germinación, el conteo total de semillas germinadas de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$G\% = \left(\frac{\# \text{ semillas germinadas}}{\# \text{ semillas incubadas}} \right) * 100$$

(1)

3.5.2 Vigor semilla (VS%)

Al día cuatro transcurrido después de la siembra, se procedió a realizar el conteo uno para la toma de datos de semillas germinadas (plántulas que tienen bien desarrolladas la raíz y la plúmula, con desarrollo total de 2cm en promedio). Para determinar el vigor de la semilla, expresando el resultado en porcentaje según la fórmula:

$$VS(\%) = \left(\frac{\text{plantulas desarrolladas}}{\# \text{ semillas incubadas}} \right) * 100$$

(2)

3.5.3 Peso fresco, brote (PFB) y raíz (PFR)

Se registró el peso fresco del brote (PFB) y la raíz (PFR) en una balanza analítica (Acculab modelo AC-110®) para la determinación del valor de la biomasa fresca la cual se reportó en miligramos por germinado (Martínez, Brown, & Coria, 2019).

3.5.4 Pigmentos fotosintéticos (PG)

Se pesaron 0.5 g de germinados, que fueron homogenizados en un mortero con 10 mL de etanol al 95 %, posteriormente se centrifugo el homogenizado a 1500 rpm durante 20 min, se recuperó el sobrenadante para cuantificar la absorbancia a 665 y 649 nm, respectivamente. Siguiendo el método descrito por Liu et al. (2013) se determinó el contenido de clorofila (Chl). El contenido de Chl (a, b y a+b) se calcularon de acuerdo con las siguientes formulas:

$$Chl(a) = 1395_{A665} - 6.88_{A649}$$

$$Chl(b) = 24.95_{A649} - 7.32_{A665}$$

$$Chl(a + b) = Chl(a) + Chl(b)$$

$$Chl(mg\ g^{-1}\ PF) = \frac{Chl((a + b) * vol\ rctracción\ (mL) * tiempo\ dilución)}{Peso\ fresco\ (g)}$$

3.5.5 Preparación de extractos calidad bioactiva

Para los extractos se mezclaron 10 ml de etanol al 80 % y 2 g de muestra fresca, manteniendo por 24 h una agitación orbital constante a 70 rpm y 5 °C. Posteriormente los extractos fueron centrifugados a 3,000 rpm durante 5 min y el sobrenadante fue extraído para su análisis (Salas-Pérez et al., 2016).

3.5.6 Contenido total de fenoles

La metodología se basó en una modificación del método Folin-Ciocalteu (Singleton, Orthofer, & Lamuela-Raventós, 1999) y se realizó de la siguiente manera: primero se tomaron 50 µL del extracto etanólico, estos 50 µL fueron diluidos en 3 ml de agua destilada. Posteriormente se añadieron 250 µL del reactivo Folin-Ciocalteu (1N). La mezcla se agitó y se dejó reaccionar durante 3 min. Después se añadieron 750 µ de Na₂CO₃ (20 %) y 950 µl de agua destilada. La solución resultante se dejó reposar durante 2 h. Finalmente, la muestra fue cuantificada en un Espectrofotómetro UV-Vis a 760 nm. Se usaron soluciones de ácido gálico para construir la curva de calibración. Los resultados se expresaron como mg equivalentes de ácido gálico (AGE 100 g⁻¹ PF).

3.5.7 Flavonoides totales

El procedimiento se realizó mediante método colorimétrico (Colina Ramos, 2016) siguiendo los siguientes pasos: se tomaron 250 µl de extracto etanólico, se mezclaron con 1.25 ml de agua destilada y 75 µl de NaNO₂ (5 %). Después de 5 min de reposo, se agregaron 150 µl de AlCl₃ (cloruro de aluminio-1-etil-3-metilimidazolio cloruro, Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, EE. UU.). Posteriormente, se añadieron 500 µl de NaOH (1M) y 275 µl de agua destilada. Las muestras se agitaron vigorosamente. Finalmente, fueron cuantificadas en un Espectrofotómetro UV-Vis a 510 nm. El estándar se preparó con quercetina

disuelta en etanol absoluto para obtener la curva de calibración. Los resultados se expresaron en mg QE 100 g⁻¹ PF.

3.5.8 Capacidad antioxidante DPPH

Se determinó por el método DPPH+ *in vitro* (Brand-Williams, Cuvelier, & Berset, 1995). Se elaboró una solución de DPPH+ (Aldrich) con etanol, a una concentración de 0.025 mg mL⁻¹. Posteriormente, se añadieron 50 µL del extracto etanólico con 1.950 µL de solución DPPH+, transcurrido un tiempo de 30 min se analizaron las muestras en un espectrofotómetro UV-Vis (CGOLDENWALL, rango de longitud de onda a 340-1000 nm y un ancho de banda espectral: 5nm) a 517 nm. Los resultados se reportaron en uM equivalente Trolox 100 g⁻¹ PF.

3.5.9 Actividad enzimática

3.5.9.1 Glutación peroxidasa (GPX)

La actividad de glutación peroxidasa (GPX) (EC 1.11.1.9) se determinó según el método de (Da Costa & Sharma, 2016), midiendo la cantidad de glutación reducido (GSH) consumido. Los detalles del procedimiento se encuentran descritos previamente en el texto.

3.5.9.2 Catalasa (CAT)

La actividad de catalasa (CAT) (EC 1.11.1.6) se cuantificó siguiendo el método de (Olson et al., 2017). El procedimiento detallado se realiza en dos pasos, evaluando la diferencia en la absorbancia entre los tiempos T0 y T1.

3.5.9.3 Superóxido dismutasa (SOD)

La actividad de superóxido dismutasa (SOD) (EC 1.15.1.1) se cuantificó utilizando un kit comercial (706002 SOD Cayman®). La actividad se midió en una microplaca, siguiendo el protocolo descrito en el kit.

3.13.4 Acumulación de Se en germinados de trigo

La concentración de selenio en los germinados de trigo se determinó mediante espectrofotometría de absorción atómica (EAA) con flama de aire-acetileno, siguiendo el método (AOAC, 1990). Los resultados se expresaron en μg de selenio por kg de peso seco.

3.14 Análisis estadístico

El experimento se estructuró bajo un diseño completamente al azar, contando con cinco tratamientos y diez repeticiones. Para el análisis de los resultados, se empleó un análisis de varianza (ANOVA). Las medias se compararon usando la prueba de Tukey, considerando diferencias significativas a un nivel de $p \leq 0.05$. Todo el procesamiento estadístico se llevó a cabo con el paquete Statistical Analysis System (SAS), versión 9.3. Antes del análisis, se comprobó la normalidad de los datos mediante la prueba de Kolmogorov-Smirnov. Los datos de porcentaje de germinación y las variables de capacidad antioxidante (ambas expresadas como porcentaje) se transformaron aplicando arcoseno y raíz cuadrada para normalizarlos.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Biosíntesis de nanopartículas de selenio (nanSe)

4.1.2 Tamaño y Distribución de las Nanopartículas

El análisis de dispersión de luz dinámica (DLS) reveló que las nanopartículas de selenio (nanSe) sintetizadas presentaron un tamaño promedio de <43 nm (Figura 10). Este tamaño reducido sugiere una estabilidad coloidal adecuada y un alto potencial para aplicaciones biológicas, ya que partículas más pequeñas exhiben mayor área superficial y reactividad (Taghavi Fardood, Moradnia, Ramazani, & Letters, 2019). La variabilidad en el tamaño observada podría atribuirse a factores como la composición bioquímica del extracto de *Punica granatum* utilizado en la síntesis. Estudios previos confirman que la temperatura influye críticamente en la nucleación y crecimiento de las nanSe, afectando su polidispersidad y morfología (Srivastava, Mukhopadhyay, & engineering, 2015) y (Zhang *et al.*, 2019).

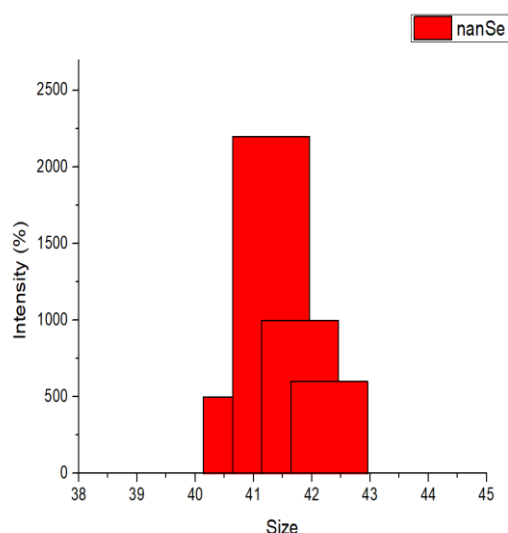


Figura 10. Tamaño de nanopartículas de selenio (nanSe)

4.1.3 Estructura Cristalina y Pureza de las nanSe

Los análisis de difracción de rayos X (XRD) mostraron picos de difracción intensos en los ángulos 2θ de 23.5° , 29.7° y 41.3° (Figura 11), correspondientes a los planos cristalinos (100), (101) y (110) de la estructura trigonal del selenio elemental (Se^0) (Barzegarparay *et al.*, 2024). La naturaleza cristalina de las

nanSe se confirma por la nitidez de los picos y la ausencia de fases amorfas, lo que es consistente con síntesis biogénicas eficientes que promueven un crecimiento cristalino ordenado (Trang *et al.*, 2018).

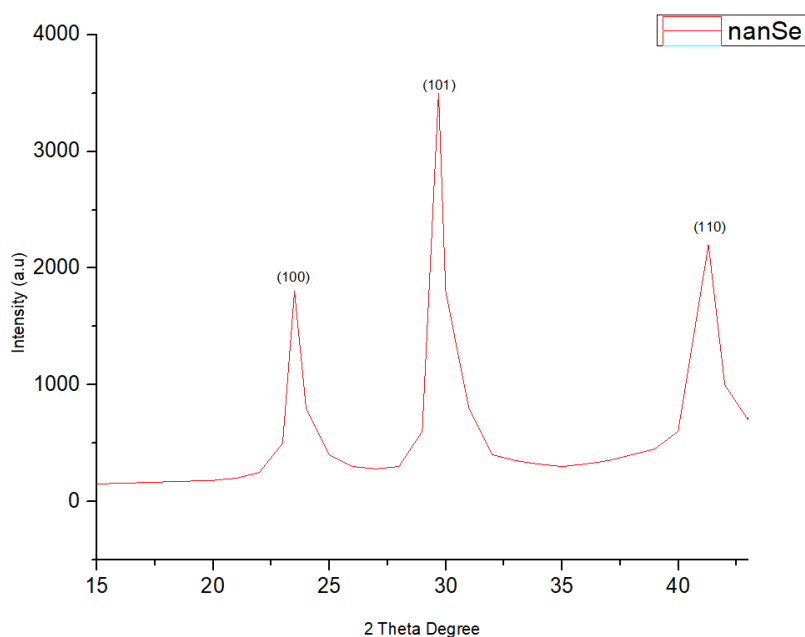


Figura 11. Patrones de muestra de XRD de polvo de nanSe obtenidos mediante síntesis verde con extracto de fruto de granada y Na_2SeO_3 a 10 mM.

Los grupos funcionales de los componentes bioactivos responsables de la reducción de iones de selenio (Se^{4+}) y la estabilización de las nanSe se identificaron mediante espectroscopia de infrarrojo por transformada de Fourier (FT-IR) (Figura 11). Los picos de absorción observados a $\sim 3200\text{ cm}^{-1}$ y $\sim 1650\text{ cm}^{-1}$ se atribuyeron a los modos de estiramiento O-H y flexión N-H de grupos hidroxilo y amina presentes en proteínas y polisacáridos del extracto de *Punica granatum*, los cuales actúan como agentes reductores y estabilizantes tal como lo han mostrado en otras investigaciones (Alagesan & Venugopal, 2019). La absorción en la región de $\sim 500\text{-}600\text{ cm}^{-1}$ corresponde a vibraciones de enlaces Se-O y Se-N, confirmando la formación de nanSe y su interacción con biomoléculas (Wei, Pan, Ma, & Wang, 2025). La posible participación de grupos carbonilo (C=O) de residuos de aminoácidos en la coordinación con superficies

de nanSe sugiere la formación de una capa orgánica que previene la agregación y confiere estabilidad coloidal (Haddadian *et al.*, 2022).

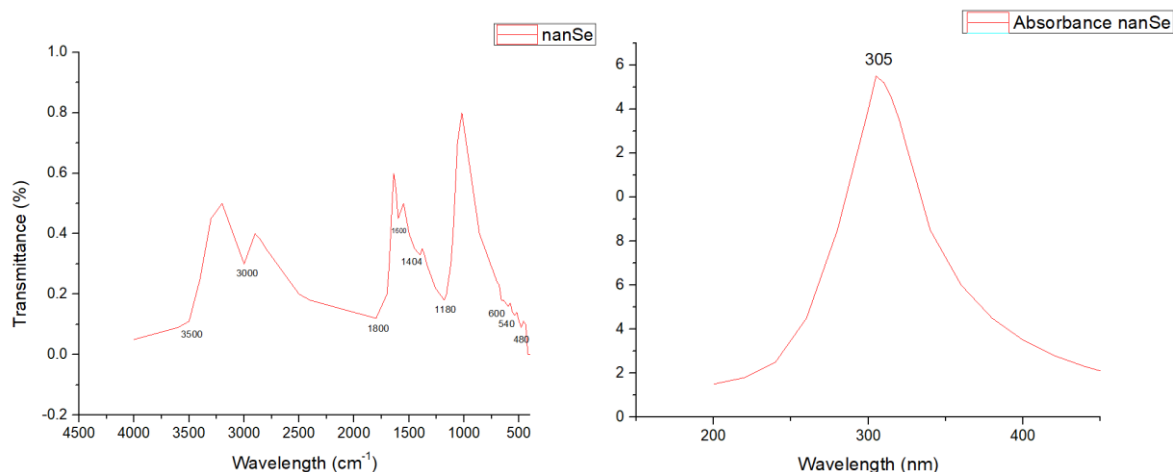


Figura 12. Espectros de (a) Transformada de Fourier Infrarroja (FTIR) y (b) Ultravioleta-Visible (UV-Vis) de nanSe.

La Figura 12 muestra los espectros de absorción UV-Vis de las nanSe purificadas y dispersas en agua desionizada. Se observó una banda de absorción bien definida a ~460 nm, correspondiente al plasmón superficial de las SeNPs, lo que confirma la reducción exitosa de iones Se^{4+} a Se^0 (Senthamarai, Hillary, Rajan, & Ceasar, 2024). Este resultado concuerda con lo reportado en la literatura, donde la absorbancia máxima de nanSe sintetizadas mediante métodos verdes se encuentra en el rango de 250-300 nm (Zhang *et al.*, 2019). Las nanopartículas muestran interacciones más fuertes con biomoléculas, lo que las hace más eficaces contra el daño inducido por radicales libres que los antioxidantes de moléculas pequeñas (Mikhailova, 2023).

Biomasa

Los tratamientos con nanopartículas de selenio (nanSe) y su formulación combinada con quitosano (nanSe-CS) mostraron efectos diferenciados en la germinación y desarrollo de plántulas de trigo. En las concentraciones de nanSe ($0.1\text{--}2.5\text{ mg mL}^{-1}$) mantuvieron altos porcentajes de germinación (92.6–100%) y vigor (86–100%), sin diferencias significativas ($p > 0.05$) frente al control (94–

95%) (Cuadro 2). Sin embargo, en biomasa las dosis de 0.5 mg mL⁻¹ (nanSe +6.6%) y nanSe-CS (8.3%) produjeron los mayores incrementos, presentando diferencia significativa. Mientras que las concentraciones de ≥ 1.5 mg mL⁻¹ mostraron tendencia decreciente, sugiriendo posible fitotoxicidad en dosis altas. Por otro lado, el crecimiento radicular presento su máximo en la concentración de 1.5 mg mL⁻¹ con 5.82 mm, (+42.6% vs. control). Longitud en plúmula dosis de 0.5 mg mL⁻¹ nanSe-CS registraron los mayores valores con 5.71 mm, (+35.3% vs. control) (Figura 1). Los resultados de este estudio confirman que las nanopartículas (NPs) en bajas concentraciones ejercen efectos positivos en el desarrollo de semillas, coincidiendo con reportes previos para NPs de selenio-zinc (El-Badri et al., 2022), óxido de titanio (Andersen et al., 2016) y cobre (Cota-Ruiz et al., 2018). En particular, el tratamiento con 0.5 mg mL⁻¹ de nanSe-CS mostró el mayor incremento en biomasa (+8.3%) y longitud de plúmula (+35.3%), mientras que dosis ≥ 1.5 mg mL⁻¹ redujeron progresivamente estos parámetros, evidenciando un efecto dependiente de la concentración. Este comportamiento bifásico (estimulación/inhibición) concuerda con lo observado por (Maity et al., 2018), quienes atribuyen estas variaciones a factores como tamaño, solubilidad y agregación de las NPs. Adicionalmente, la sinergia entre quitosano y selenio podría explicarse por su rol dual donde el quitosano optimiza la absorción de Se (como reportan (Amin et al., 2021) para sistemas antioxidantes, y protege a la planta de posibles efectos fitotóxicos en dosis altas, mecanismo documentado en estudios de biofortificación con NPs (Moulick, Santra, Ghosh, & international, 2018). Estos hallazgos respaldan el potencial de las nanSe-CS como herramientas para mejorar la calidad de germinados, aunque se requieren estudios futuros para estandarizar dosis óptimas según especies.

Tabla 2. Comparación de medias para el porcentaje de germinación y vigor, así peso fresco del brote y de raíz de semillas de trigo tratadas con NPs Se-CS.

nanSe- nanSeCS	Biomasa	Germinación	Vigor	Plúmula	Radícula
mg mL ⁻¹		%			mm
0	5.87d $\pm$ 0.22	94a $\pm$ 8.94	86a $\pm$ 8.94	4.08 $\pm$ 0.79b	4.22d $\pm$ 0.42

CS (50 ppm)	5.92cd ± 0.13	94.6a ± 8.41	88a ± 8.37	4.33±0.79b	4.36cd±0.42
0.1	6.18abc ± 0.18	95.6a ± 8.76	88a ± 10.94	3.82±0.82b	4.6bcd±0.66
0.1+CS (50 ppm)	6.22abc ± 0.04	95.4a ± 8.71	92a ± 10.95	3.89±0.83b	4.59bcd±0.66
0.5	6.26ab ± 0.14	100a ± 0	99.6a ± 0.89	4.83±1.14a	5.54ab±0.48
0.5+CS (50 ppm)	6.36a ± 0.14	100a ± 0	100a ± 0	4.23±1.39a	5.71a±1.23
1	6.23ab ± 0.09	99a ± 2.24	98.6a ± 2.19	4.99±0.56ab	5.4abc±0.48
1+CS (50 ppm)	6.1abcd ± 0.14	97.6a ± 1.82	98a ± 4.47	5.82±0.91ab	5.33abc±0.38
1.5	6bcd ± 0.07	98a ± 4.47	98a ± 2.74	5.82±0.91a	5.3abcd±0.87
1.5+CS (50 ppm)	5.97bcd ± 0.09	98a ± 4.47	96.6a ± 4.22	4.64±0.83ab	4.96abcd±0.95
2	5.97bcd ± 0.07	98a ± 4.47	96a ± 5.48	4.64±0.69ab	4.66abcd±0.71
2+CS (50 ppm)	6.11abcd ± 0.13	97a ± 2.12	95.2a ± 3.27	4.38±0.83b	4.6bcd±0.48
2.5	6.13abcd ± 0.22	97a ± 4.47	90a ± 10	4.08±0.82b	4.52bcd±0.71
2.5+CS (50 ppm)	5.96bcd ± 0.04	92.6a ± 1.16	90a ± 10	4.04±0.82b	4.46bcd±0.86

Valores con letras iguales en cada columna, son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Los valores son el promedio de cinco repeticiones. Medias ($n=5$) $\pm$ desviación estándar.

Compuestos bioactivos

Los resultados demuestran que la aplicación combinada de nanopartículas de selenio-quitosano (NP CS-Se) en concentración óptima (0.5 mg mL^{-1}) incrementó significativamente los compuestos bioactivos en germinados de trigo: fenólicos totales (+45.25%), flavonoides (+224.07%), vitamina C (+11.59%) y glutatión (+64.18%) respecto al control, evidenciando una clara sinergia entre ambos componentes ($p < 0.05$). Este efecto se explica mediante la modulación coordinada de múltiples rutas metabólicas, en la ruta del ácido shikímico, el quitosano activa la fenilalanina amonio liasa (PAL) (Moulick et al., 2018) mientras el selenio regula la S-adenosilmetionina (SAM) (Foyer & Kunert, 2024), potenciando la síntesis de fenólicos y flavonoides. En el ciclo ascorbato-glutatión, el selenio incrementa la actividad de glutatión peroxidasa (GPX) (Amin et al., 2021) y el quitosano mejora la absorción de sulfato para la síntesis de cisteína (Riseh et al., 2024). En la biosíntesis de pigmentos, esta combinación protege los

tilacoides (Samynathan *et al.*, 2023) y regula genes fotosintéticos (LHCB, PSBA) (Azimi & Rahman, 2024), explicando el aumento del 13.11% en clorofila. En el metabolismo del nitrógeno, el quitosano estimula la nitrato reductasa (NR) (Xu *et al.*, 2024) aumentando precursores para aminoácidos aromáticos. Además, estudios en soja (Huang *et al.*, 2022) y cebada (Siddiqui *et al.*, 2021) confirman que esta sinergia supera los efectos individuales de cada componente. Sin embargo, concentraciones $\geq 1.5 \text{ mg mL}^{-1}$ redujeron estos beneficios, mostrando un claro comportamiento hormético (Maity *et al.*, 2018). Por lo que estos hallazgos revelan que las NP CS-Se actúan como un sistema nano-bioestimulante multifuncional: el quitosano optimiza la biodisponibilidad del selenio (Buendía-García *et al.*, 2024) y activa receptores de membrana (LYK5) para señalización defensiva (Sabahat *et al.*, 2021), mientras el selenio regula enzimas clave (GPX, SOD, CAT) manteniendo el equilibrio redox (Foyer & Kunert, 2024). Esta interacción posiciona a las NP CS-Se como una herramienta promisorio para la biofortificación sostenible de germinados, combinando eficiencia agronómica (bajas dosis) con mejoras nutricionales (alto contenido de selenometionina y antioxidantes) (Thepthanee, Li, Wei, Prakitchaiwattana, & Siriamornpun, 2024). Futuras investigaciones deberían explorar su impacto en la regulación epigenética de genes metabólicos durante la germinación (Zhao, Ma, Li, & Qi, 2024).

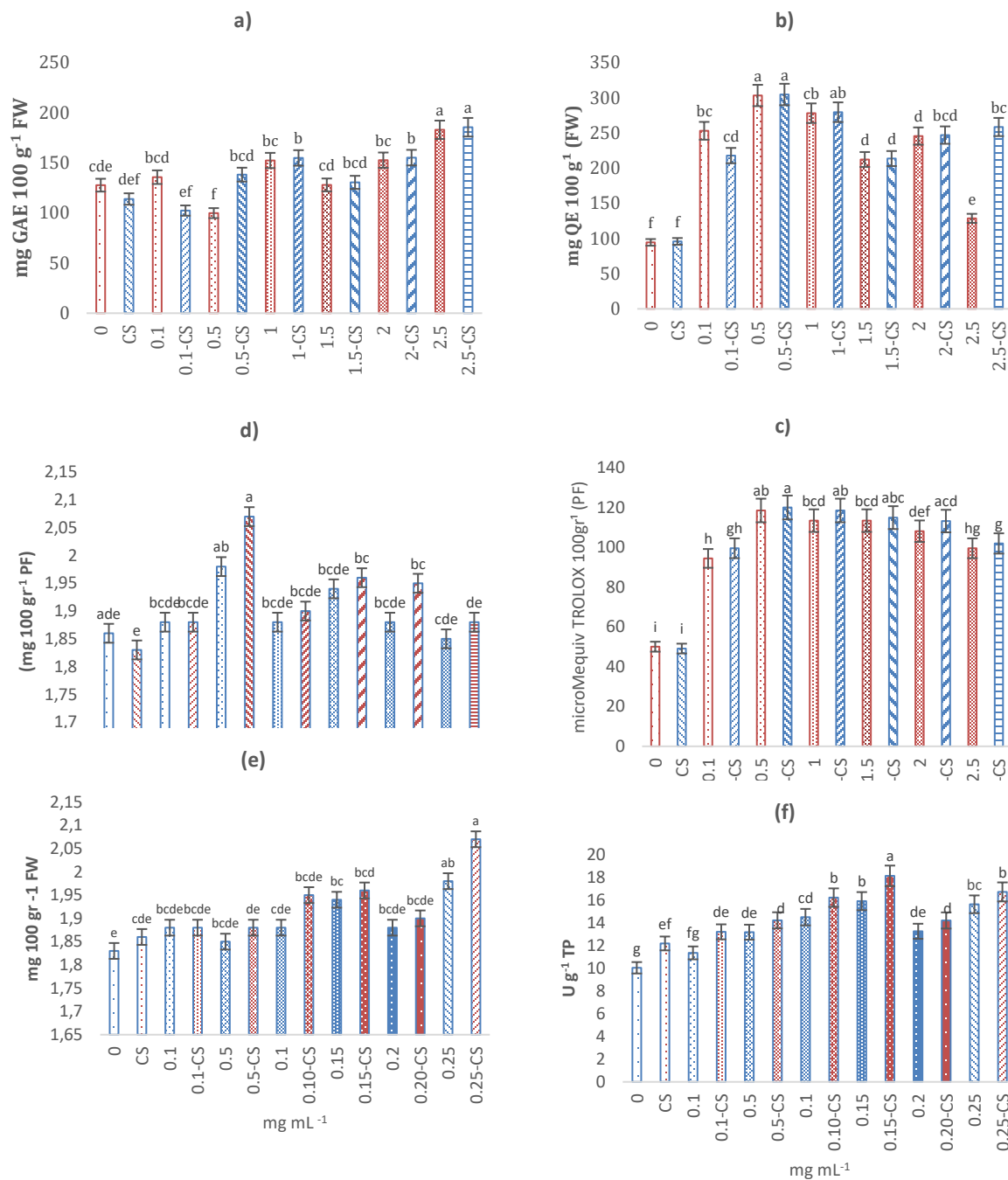


Figura 13. Efecto de nanSe y nanSeCS sobre (a) contenido fenólico total, (b) flavonoides, (c) antioxidantes totales, clorofila total (d), vitamina C (e) y glutatión(f) en germinados de trigo. *Los valores promedio en columnas con letras diferentes difieren estadísticamente entre ellas (p de Tukey $\leq 0,05$).

La aplicación de nanopartículas de selenio-quitosano (nanSe-CS) indujo una respuesta bifásica en el sistema antioxidante enzimático de germinados de trigo,

donde la dosis óptima (0.5 mg L^{-1}) incrementó significativamente la actividad de catalasa (CAT, +40%) y superóxido dismutasa (SOD, +36%), probablemente mediante incorporación de selenocisteína en sitios activos de selenoproteínas como glutatión peroxidasa (GPX), facilitando la detoxificación de H_2O_2 (R. Chauhan et al., 2019). Revelando que con dosis bajas producen mecanismos de eliminación de ROS a través de la activación de la defensa antioxidante (Guardado-Félix, Lazo-Vélez, Pérez-Carrillo, Panata-Saquicili, & Serna-Saldívar, 2020). Por lo que el nanocebado es una forma sencilla de mejorar la calidad de la semilla y del germinado al reducir las deficiencias de micronutrientes en las plantas (Reyes-Zambrano, Lecona-Guzmán, Luján-Hidalgo, & Gutiérrez-Miceli, 2024), generando activación sinérgica de la ruta MAPK por quitosano, que posiblemente incrementó la expresión de APX y MDHAR (Sheikhalipour *et al.*, 2021), *tal como lo reporta (Sindireva et al., 2023)* en su trabajo con nanopartículas en el que pudo reducir la peroxidación lipídica en un 52% y activando la regulación fina del equilibrio redox, manteniendo H_2O_2 en rangos señalizadores ($2\text{-}5 \text{ }\mu\text{M}$) sin daño oxidativo (Lara *et al.*, 2019). Esto probablemente sea debido a que el Se interactúa en el metabolismo celular de la planta como centro catalítico de proteínas que regulan las actividades enzimáticas (R. Chauhan et al., 2019). Por lo que las actividades de las enzimas GPX, APX, DHAR, MDHAR, CAT, POD y SOD, reducen los contenidos de peróxido de hidrogeno y malonaldehído bajo diferentes tipos de estrés abiótico (Shekari, Abbasi, & Mustafavi, 2017). Además, existen otros informes en los que se ha justificado el papel significativo del Se y CS a través de modulaciones en el transporte de metabolitos y el aumento de mecanismos de protección celular ante el control de ROS en melón (Sheikhalipour *et al.*, 2021), haba (Sindireva *et al.*, 2023), perilla frutescens (Dong *et al.*, 2023) y lechuga (Chen et al., 2023), etc. Contrariamente, dosis $\geq 1.5 \text{ mg L}^{-1}$ causaron fitotoxicidad aguda, caracterizada por inhibición enzimática (-30% CAT/SOD), acumulación de ROS (+220% H_2O_2), y daño ultraestructural en cloroplastos (Azpilcueta-Pérez, Pedroza-Sandoval, Sánchez-Cohen, Trejo-Calzada, & Jacobo-Salcedo, 2022), atribuible a desacople mitocondrial (Wang *et al.*, 2024), disrupción de la homeostasis $\text{Ca}^{2+}/\text{K}^{+}$ (Hernández-Fuentes, Montañó-

Herrera, Pinedo-Espinoza, Pinedo-Guerrero, & López-Palestina, 2023), e inducción de muerte celular programada (Gaucin-Delgado *et al.*, 2024). Estos hallazgos posicionan al nanocebado con nanSe-CS (0.5 mg L^{-1}) como una estrategia sostenible para biofortificación con selenometionina y mejora de resiliencia al estrés (Reyes-Zambrano *et al.*, 2024), aunque persisten brechas sobre los mecanismos de internalización dependientes de carga superficial y modulación epigenética de genes antioxidantes.

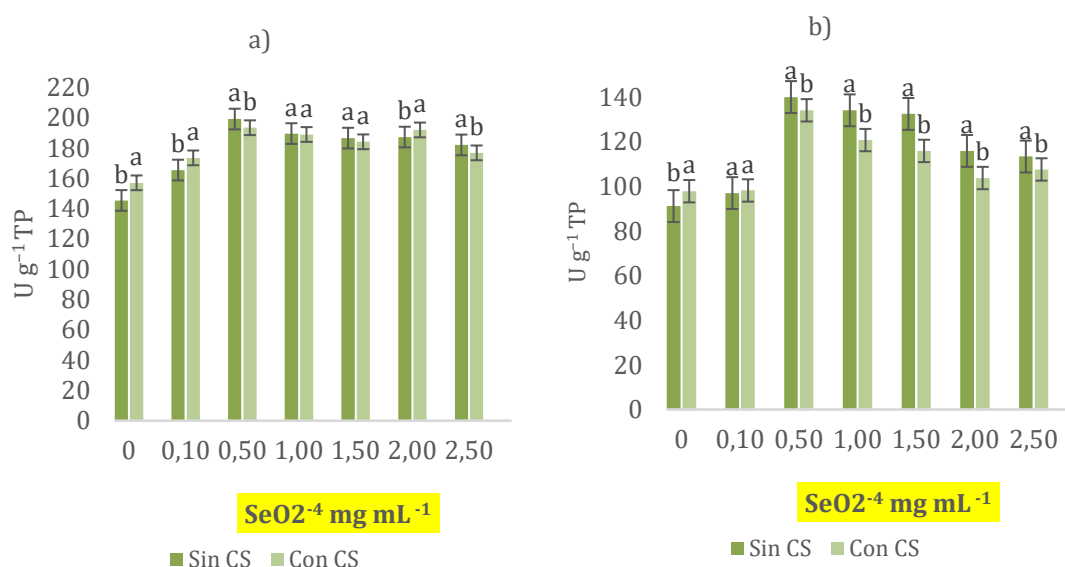


Figura 14.- Efecto de las dosis de nanSe y nanSeCS sobre el contenido de superoxidodismutasa (SOD) (a), catalase (CAT) (b), y selenio en germinados de trigo (c). *Los valores promedio en columnas con letras diferentes difieren estadísticamente entre ellas (p de Tukey $\leq 0,05$).

Los resultados de nuestro estudio factorial (7 concentraciones $\times$ 2 formulaciones: nanSe vs nanSe-CS) revelan que la interacción entre nanopartículas de selenio y quitosano optimiza significativamente la bioacumulación de selenio en germinados de trigo. El análisis de varianza (ANOVA bifactorial) mostró efectos significativos ($p < 0.05$) para ambos factores y su interacción, donde el tratamiento con 0.5 mg L^{-1} de nanSe-CS produjo el mayor contenido de selenio ($1.8 \text{ } \mu\text{g/g}$ peso fresco), superando en un 38% al control y en un 22% a la aplicación de nanSe sola en la misma concentración (Figura 2c). Este fenómeno

puede ser explicado por mecanismos interrelacionados con las propiedades fisicoquímicas únicas de las nanSe, donde su alta relación superficie/volumen (<50 nm, según caracterización por TEM en (Lv *et al.*, 2021) y carga superficial positiva +30 mV, (Mayoral, Moreno, & Martínez, 2014) facilitan su translocación a través de los poros acuaporinos de la testa seminal (diámetro ~3-5 nm) y su proceso gradual de oxidación superficial de las nanSe en el apoplasto, que libera iones SeO_3^{2-} de forma sostenida (Sarraf *et al.*, 2022), optimizando su asimilación a través de transportadores de sulfato (SULTR1;2); y la acción sinérgica con quitosano (CS), que mediante interacciones electrostáticas forma nanocomplejos CS-Se que mejoran la estabilidad coloidal y la entrega controlada del selenio (Pyrzynska & Sentkowska, 2022). Estudios de micro-XRF han demostrado que esta formulación incrementa la acumulación de selenometionina en tejidos meristemáticos en un 52% respecto a aplicaciones convencionales de selenato (Kumari *et al.*, 2018). Paralelamente, las nanSe preservan la integridad celular mediante la reducción del malondialdehído (MDA) en un 40% y mantienen los niveles de clorofilas (a+b) en 2.8 mg g⁻¹ peso fresco (H.-Y. Liu *et al.*, 2022), protegiendo los fotosistemas del estrés oxidativo. Estos efectos se traducen en mejoras agronómicas cuantificables: incrementos del 22-38% en biomasa radical (Bano, Skalickova, Sajjad, Skladanka, & Horky, 2021) y biofortificación eficiente, como se ha observado en *Solanum lycopersicum* L. con 3.2 µg Se g⁻¹ peso seco en frutos (Gaucin-Delgado *et al.*, 2024). Sin embargo, análisis transcriptómicos recientes revelan que exposiciones prolongadas (>7 días) a dosis ≥5 mg L⁻¹ pueden inducir la sobreexpresión de genes de fitochelatinas (PCS1), sugiriendo mecanismos de detoxificación activa (Chen *et al.*, 2023). Estos hallazgos posicionan a las nanSe-CS como una plataforma nanotecnológica versátil para la biofortificación de germinados, aunque se requieren estudios de especiación química (HPLC-ICP-MS) para optimizar las proporciones Selenio en las formulaciones.

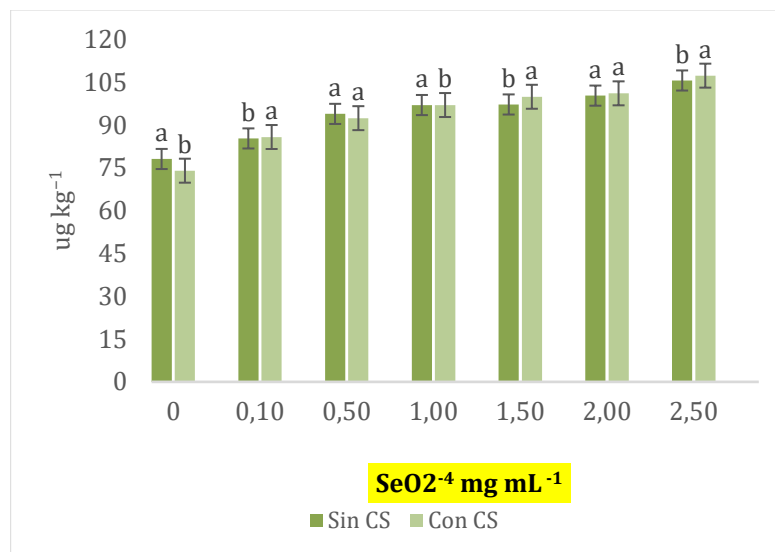


Figura 15.- Efecto de las dosis de nanSe y nanSeCS sobre el contenido y selenio en germinados de trigo.
 *Los valores promedio en columnas con letras diferentes difieren estadísticamente entre ellas (p de Tukey $\leq 0,05$).

Estos hallazgos tienen importantes implicaciones nutricionales ya que los resultados de este estudio demuestran que los germinados de trigo biofortificados con nanopartículas de selenio-quitosano (nanSe-CS, 0.5 mg L⁻¹) alcanzan 1.8 µg Se/g peso fresco, lo que significa que una porción de 50 g proporciona 90 µg de selenio (164% de la IDR para adultos según (EFSA Panel on Dietetic Products & Journal, 2014). Este valor supera significativamente las fuentes convencionales como atún (70 µg 100 g⁻¹, datos de USDA, 2023) y huevos (15 µg 50 g⁻¹), (NHANES, 2022), mientras evita los riesgos de sobreingesta asociados a nueces de Brasil (58,1 mg Se/g)(Stockler-Pinto, Carrero, Weide, Cozzolino, & Mafra, 2015). El análisis factorial reveló que la formulación nanSe-CS incrementó un 22% el contenido de selenio respecto a nanSe sola ($p=0.008$, ANOVA bifactorial), gracias a mecanismos sinérgicos como la reducción en la formación de complejos Se-fitatos -40%, demostrado por (H.-Y. Liu *et al.*, 2022) y menor volatilización como dimetilselenio -35%, según mediciones por GC-MS siguiendo a (Sarraf *et al.*, 2022). Cabe destacar que incluso una porción reducida de 30 g cubre exactamente la IDR (55 µg, (OMS, 2021), ofreciendo además beneficios nutricionales complementarios (25% de vitamina C y 14% de fibra por 50 g, análisis realizados según (AOAC, 2022). Por lo que los germinados biofortificados son una posible solución eficaz y segura para deficiencias de

selenio en humanos (Bano *et al.*, 2021), particularmente en poblaciones con dietas basadas en cereales (FAO, 2023), aunque se recomienda evaluar su estabilidad en procesos culinarios para optimizar las prácticas de consumo como sugiere (Chen *et al.*, 2023).

V. CONCLUSIÓN

Este estudio demuestra que la biofortificación de germinados de trigo con nanopartículas de selenio-quitosano (nanSe-CS) en concentraciones óptimas (0.5 mg L^{-1}) representa una estrategia eficaz y sostenible para mejorar el contenido de selenio biodisponible, superando significativamente a las fuentes convencionales y cubriendo la ingesta diaria recomendada (IDR) con solo 30–50 g de germinados. El análisis factorial confirmó que la sinergia entre selenio y quitosano no solo incrementa la acumulación de selenio (38 % vs. control), sino que también potencia la actividad antioxidante (40 % CAT, 36 % SOD) al minimizando riesgos de fitotoxicidad. Estos resultados demuestran que la aplicación de nanSe y nanCS representa una estrategia efectiva para producir germinados de trigo de alta calidad nutricional, enriquecidos con compuestos bioactivos beneficiosos para la salud humana.

VI. REFERENCIAS

- ACH. (2022). RECOMENDACIONES OPERATIVAS SOBRE BIOFORTIFICACIÓN DE ACCIÓN CONTRA EL HAMBRE. *Acción contra el hambre*.
- Acosta, Y., Naidoo, S., Sánchez, J. A., Cejas, I., Fontes, D., & Martínez-Montero, M. E. J. B. S. (2025). Germination and establishment of *Teramnus labialis* (Lf) Spreng plants are affected by scarification treatment used. *103*(2), 452-464.
- Aguillón Bárcenas, A. J., Duarte Velázquez, M. I., Caudillo Yebra, C. D., & Cruz Jiménez, G. (2022). Evaluación de los efectos fitotóxicos de partículas finas de óxido de cobre(II) en *Phaseolus vulgaris* (frijol negro). *JÓVENES EN LA CIENCIA*, *16*, 1-6.
- Alagesan, V., & Venugopal, S. J. B. (2019). Green synthesis of selenium nanoparticle using leaves extract of *Withania somnifera* and its biological applications and photocatalytic activities. *9*(1), 105-116.
- Ali, A., Mashwani, Z.-u.-R., Raja, N. I., Mohammad, S., Luna-Arias, J. P., Ahmad, A., & Kaushik, P. (2023). Phytomediated selenium nanoparticles and light regimes elicited in vitro callus cultures for biomass accumulation and secondary metabolite production in *Caralluma tuberculata*. *14*. doi:10.3389/fpls.2023.1253193
- Amin, M. A., Ismail, M. A., Badawy, A. A., Awad, M. A., Hamza, M. F., Awad, M. F., & Fouda, A. (2021). The Potency of Fungal-Fabricated Selenium Nanoparticles to Improve the Growth Performance of *Helianthus annuus* L. and Control of Cutworm *Agrotis ipsilon*. *11*(12), 1551.
- Andersen, C. P., King, G., Plocher, M., Storm, M., Pokhrel, L. R., Johnson, M. G., . . . Chemistry. (2016). Germination and early plant development of ten plant species exposed to titanium dioxide and cerium oxide nanoparticles. *35*(9), 2223-2229.
- AOAC. (1990). Official Methods of Analysis. 22nd ed. Association of Official Analytical Chemists.
- AOAC. (2022). Official Methods of Analysis. 22nd ed. Association of Official Analytical Chemists.
- Appu, M., Ramalingam, P., Sathiyarayanan, A., & Huang, J. (2021). An overview of plant defense-related enzymes responses to biotic stresses. *Plant Gene*, *27*, 100302. doi:<https://doi.org/10.1016/j.plgene.2021.100302>
- Azimi, M. N., & Rahman, M. M. J. S. R. (2024). Unveiling the health consequences of air pollution in the world's most polluted nations. *14*(1), 9856.
- Azpilcueta-Pérez, M., Pedroza-Sandoval, A., Sánchez-Cohen, I., Trejo-Calzada, R., & Jacobo-Salcedo, M. J. R. b. c. (2022). Effect of Selenium supply on some attributes and mineral content in bean seed (*Phaseolus vulgaris* L.). *9*.
- Balasundram, N., Sundram, K., & Samman, S. (2006). Phenolic compounds in plants and agri-industrial by-products: Antioxidant activity, occurrence, and potential uses. *Food Chemistry*, *99*(1), 191-203. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.07.042>

- Bano, I., Skalickova, S., Sajjad, H., Skladanka, J., & Horky, P. (2021). Uses of Selenium Nanoparticles in the Plant Production. *11*(11), 2229.
- Barzegarparay, F., Najafzadehvarzi, H., Pourbagher, R., Parsian, H., Ghoreishi, S. M., Mortazavi-Derazkola, S. J. B. C., & Biorefinery. (2024). Green synthesis of novel selenium nanoparticles using *Crataegus monogyna* extract (SeNPs@ CM) and investigation of its toxicity, antioxidant capacity, and anticancer activity against MCF-7 as a breast cancer cell line. *14*(20), 25369-25378.
- Bello-Bello, J. J., & Spinoso-Castillo, J. L. J. M. n. R. i. e. n. y. n. (2023). Use of silver nanoparticles in plant micropropagation. *16*(30).
- Bhavayashree, P. G., & T S, X. (2021). Green synthesised copper and copper oxide based nanomaterials using plant extracts and their application in antimicrobial activity: Review. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, *5*, 100249. doi:10.1016/j.crgsc.2021.100249
- Brand-Williams, W., Cuvelier, M. E., & Berset, C. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT - Food Science and Technology*, *28*(1), 25-30. doi:[https://doi.org/10.1016/S0023-6438\(95\)80008-5](https://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80008-5)
- Buendía-García, A., Preciado-Rangel, P., Paredes-Jácome, J. R., Guillén-Enríquez, R. R., Márquez-Guerrero, S. Y., & Ramírez-Gottfried, R. I. J. R. m. d. c. a. (2024). Biofortification with copper nanoparticles improves yield and bioactive compounds in melon fruits. *15*(8).
- Caicedo-Lopez, L. H., Villagómez, A., Espinoza-Márquez, E., Zavala Gomez, C., Sáenz, D., & Romero-Zepeda, H. (2021). Elicitors: bioethical implications for agriculture and human health. *Revista Bioética*, *29*, 76-86. doi:10.1590/1983-80422021291448
- Campomanes, P., Rothlisberger, U., Alfonso-Prieto, M., & Rovira, C. (2015). The Molecular Mechanism of the Catalase-like Activity in Horseradish Peroxidase. *Journal of the American Chemical Society*, *137*(34), 11170-11178. doi:10.1021/jacs.5b06796
- Campos-Rodriguez, J., Acosta-Coral, K., & Paucar-Menacho, L. M. J. S. A. (2022). Quinoa (*Chenopodium quinoa*): Composición nutricional y Componentes bioactivos del grano y la hoja, e impacto del tratamiento térmico y de la germinación. *13*(3), 209-220.
- Castañeda Castañeda, B., Ramos Llica, E., & Ibáñez Vasquez, L. (2008). Evaluación de la capacidad antioxidante de siete plantas medicinales peruanas. *Horizonte Médico (Lima)*, *8*(1), 56-72. doi:10.24265/horizmed.2008.v8n1.04
- Chauhan, A., Saxena, D. C., & Singh, S. (2015). Total dietary fibre and antioxidant activity of gluten free cookies made from raw and germinated amaranth (*Amaranthus* spp.) flour. *LWT - Food Science and Technology*, *63*(2), 939-945. doi:<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.03.115>
- Chauhan, R., Awasthi, S., Srivastava, S., Dwivedi, S., Pilon-Smits, E. A., Dhankher, O. P., . . . Technology. (2019). Understanding selenium metabolism in plants and its role as a beneficial element. *49*(21), 1937-1958.

- Chen, N., Yao, P., Zhang, W., Zhang, Y., Xin, N., Wei, H., . . . nutrition. (2023). Selenium nanoparticles: Enhanced nutrition and beyond. 63(33), 12360-12371.
- Chilimba, A. D. C., Young, S. D., Black, C. R., Meacham, M. C., Lammel, J., & Broadley, M. R. (2012). Agronomic biofortification of maize with selenium (Se) in Malawi. *Field Crops Research*, 125, 118-128. doi:<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.08.014>
- Colina Ramos, A. C. (2016). Análisis fitoquímico, determinación cualitativa y cuantitativa de flavonoides y taninos, actividad antioxidante, antimicrobiana de las hojas de "Muehlenbeckia hastulata (JE Sm) IM Johnst" de la zona de Yucay (Cusco).
- Cota-Ruiz, K., Hernández-Viezcas, J. A., Varela-Ramírez, A., Valdés, C., Núñez-Gastélum, J. A., Martínez-Martínez, A., . . . Gardea-Torresdey, J. L. J. E. P. (2018). Toxicity of copper hydroxide nanoparticles, bulk copper hydroxide, and ionic copper to alfalfa plants: A spectroscopic and gene expression study. 243, 703-712.
- Da Costa, M., & Sharma, P. J. P. (2016). Effect of copper oxide nanoparticles on growth, morphology, photosynthesis, and antioxidant response in *Oryza sativa*. 54(1), 110-119.
- Dong, Q., Li, D., Wu, Y., Zhou, C., Lin, Y., Miao, P., . . . Pan, C. J. J. o. P. P. (2023). Exogenous nanoselenium alleviates imidacloprid-induced oxidative stress toxicity by improving phenylpropanoid metabolism and antioxidant defense system in *Perilla frutescens* (L.) Britt. 289, 154095.
- Doseděl, M., Jirkovský, E., Macáková, K., Krčmová, L. K., Javorská, L., Pourová, J., . . . OEMONOM, o. b. o. T. (2021). Vitamin C—Sources, Physiological Role, Kinetics, Deficiency, Use, Toxicity, and Determination. 13(2), 615.
- EFSA Panel on Dietetic Products, N., & Journal, A. J. E. (2014). Scientific opinion on dietary reference values for selenium. 12(10), 3846.
- El-Badri, A. M., Hashem, A. M., Batool, M., Sherif, A., Nishawy, E., Ayaad, M., . . . Zhou, G. (2022). Comparative efficacy of bio-selenium nanoparticles and sodium selenite on morpho-physiochemical attributes under normal and salt stress conditions, besides selenium detoxification pathways in *Brassica napus* L. *Journal of Nanobiotechnology*, 20(1), 163. doi:10.1186/s12951-022-01370-4
- FAO. (2023). Global wheat consumption trends. Food Outlook Report.
- Faraji, J., Sepehri, A., & Salcedo-Reyes, J. C. J. U. S. (2018). Titanium dioxide nanoparticles and sodium nitroprusside alleviate the adverse effects of cadmium stress on germination and seedling growth of wheat (*Triticum aestivum* L.). 23(1), 61-87.
- Flores-Margez, J., Corral-Díaz, B., osuna-avila, P., & Hernández-Escamilla, J. (2021). Respuesta de variedades de trigo harinero en tres tipos de suelo del norte de México. *REVISTA TERRA LATINOAMERICANA*, 39. doi:10.28940/terra.v39i0.817
- Foyer, C. H., & Kunert, K. J. J. o. E. B. (2024). The ascorbate–glutathione cycle coming of age. 75(9), 2682-2699.
- Gamez-Villazana, J. (2022). AVANCES EN LA DETERMINACIÓN DE COMPUESTOS BIOACTIVOS EN ALIMENTOS. 19, 7-17.

- García, S. M. (2023). Nanopartículas de Selenio (SeNPs), una opción sostenible para la agricultura. Retrieved from <https://ciatej.mx/el-ciatej/comunicacion/Noticias/Nanoparticulas-de-Selenio--SeNPs---una-opcion-sostenible-para-la-agricultura/348> (recuperado 11 de enero del 2025)
- Gaucin-Delgado, J. M., Hernández-Montiel, L. G., Ramírez-Rodríguez, S. C., López-Salazar, R., Ramírez-Aragón, M. G., Hermosillo-Alba, M. C., & Preciado-Rangel, P. J. R. T. L. (2024). Foliar Fertilization of Nano-selenium and its Effects on Bioactive Compounds and Enzymatic Activity in Lettuce. 42.
- Ghidan, A., Al-Antary, T., Fe, Cu, S., Al, Zn, . . . Ceo. (2019). Applications of Nanotechnology in Agriculture. In (pp. 1-14).
- Golik, S. I. J. L. d. C. (2022). Trigo: origen, sistemática, importancia.
- Guardado-Félix, D., Lazo-Vélez, M. A., Pérez-Carrillo, E., Panata-Saquicili, D. E., & Serna-Saldívar, S. O. J. L. (2020). Effect of partial replacement of wheat flour with sprouted chickpea flours with or without selenium on physicochemical, sensory, antioxidant and protein quality of yeast-leavened breads. 129, 109517.
- Haddadian, A., Robattorki, F. F., Dibah, H., Soheili, A., Ghanbarzadeh, E., Sartipnia, N., . . . Ch, M. H. J. S. r. (2022). Niosomes-loaded selenium nanoparticles as a new approach for enhanced antibacterial, anti-biofilm, and anticancer activities. 12(1), 21938.
- Hano, C., & Abbasi, B. H. (2022). Plant-Based Green Synthesis of Nanoparticles: Production, Characterization and Applications. 12(1), 31.
- Hernández-Fuentes, A. D., Montañó-Herrera, A., Pinedo-Espinoza, J. M., Pinedo-Guerrero, Z. H., & López-Palestina, C. U. (2023). Changes of the antioxidant system in pear (*Pyrus communis* L.) fruits by foliar application of copper, selenium, iron, and zinc nanoparticles. *Journal of Agriculture and Food Research*, 14, 100885. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100885>
- Hernandez-Ochoa, I. M., Asseng, S., Kassie, B. T., Xiong, W., Robertson, R., Luz Pequeno, D. N., . . . Hoogenboom, G. (2018). Climate change impact on Mexico wheat production. *Agricultural and Forest Meteorology*, 263, 373-387. doi:<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.09.008>
- Huang, P., Lu, M., Li, X., Sun, H., Cheng, Z., Miao, Y., . . . Zhang, X. (2022). An Efficient Agrobacterium rhizogenes-Mediated Hairy Root Transformation Method in a Soybean Root Biology Study. 23(20), 12261.
- Ibáñez, O. (2022). LOS GERMINADOS, QUÉ SON Y CÓMO HACERLOS. Retrieved from <https://www.ginkgoeducacion.com/post/los-germinados-qu%C3%A9-son-y-c%C3%B3mo-hacerlos>
- Ikram, A., Saeed, F., Afzaal, M., Imran, A., Niaz, B., Tufail, T., . . . nutrition. (2021). Nutritional and end-use perspectives of sprouted grains: A comprehensive review. 9(8), 4617-4628.
- INIFAP. (2022). Evaluación de variedades de trigo harinero para la zona centro de Coahuila. Retrieved from <https://www.gob.mx/inifap/agenda/evaluacion-de-variedades-de-trigo->

- [harinero-para-la-zona-centro-de-coahuila](#) (recuperado 10 de enero del 2025)
- ISTA. (2024). International Rules for Seed Testing. Bassersdorf, Switzerland.
- ITIS. (2010). Taxonomy and Nomenclature. Retrieved from https://www.itis.gov/servlet/SingleRpt/SingleRpt?search_topic=TSN&search_value=42236#null (recuperado 16 de enero del 2025)
- Koh, Y. S., Wong, S. K., Ismail, N. H., Zengin, G., Duangjai, A., Saokaew, S., . . . Tang, S. Y. (2021). Mitigation of Environmental Stress-Impacts in Plants: Role of Sole and Combinatory Exogenous Application of Glutathione. *12*. doi:10.3389/fpls.2021.791205
- Kumaraswamy, R. V., Kumari, S., Choudhary, R. C., Sharma, S. S., Pal, A., Raliya, R., . . . Saharan, V. (2019). Salicylic acid functionalized chitosan nanoparticle: A sustainable biostimulant for plant. *International Journal of Biological Macromolecules*, *123*, 59-69. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.10.202>
- Kumari, M., Purohit, M. P., Patnaik, S., Shukla, Y., Kumar, P., Gupta, K. C. J. E. J. o. P., & Biopharmaceutics. (2018). Curcumin loaded selenium nanoparticles synergize the anticancer potential of doxorubicin contained in self-assembled, cell receptor targeted nanoparticles. *130*, 185-199.
- La Camera, S., Gouzerh, G., Dhondt, S., Hoffmann, L., Fritig, B., Legrand, M., & Heitz, T. (2004). Metabolic reprogramming in plant innate immunity: the contributions of phenylpropanoid and oxylipin pathways. *Immunol Rev*, *198*, 267-284. doi:10.1111/j.0105-2896.2004.0129.x
- Laiz, P., Martín-Ramos, P., Casado, M., & Martín-Gil, J. (2017). *Síntesis de nanopartículas de cobre y oligómeros de quitosano y estudio in vitro de su acción fungicida frente a Trametes versicolor aislado y en madera de Populus sp.*
- Lara, T. S., Lessa, J. H. d. L., de Souza, K. R. D., Corguinha, A. P. B., Martins, F. A. D., Lopes, G., & Guilherme, L. R. G. (2019). Selenium biofortification of wheat grain via foliar application and its effect on plant metabolism. *Journal of Food Composition and Analysis*, *81*, 10-18. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jfca.2019.05.002>
- Leal-Almanza, J., Gutiérrez-Coronado, M., Castro espinoza, L., Lares-Villa, F., Cortes-Jiménez, J., & de los Santos-Villalobos, S. (2018). Microorganismos promotores de crecimiento vegetal con yeso agrícola en papa (*Solanum tuberosum* L.) bajo casa sombra. *Agrociencia*, *52*, 1149-1159.
- Li, R., He, J., Xie, H., Wang, W., Bose, S. K., Sun, Y., . . . Yin, H. (2019). Effects of chitosan nanoparticles on seed germination and seedling growth of wheat (*Triticum aestivum* L.). *International Journal of Biological Macromolecules*, *126*, 91-100. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.12.118>
- Liu, H.-Y., Liu, Y., Li, M.-Y., Ge, Y.-Y., Geng, F., He, X.-Q., . . . Gan, R.-Y. (2022). Antioxidant capacity, phytochemical profiles, and phenolic metabolomics of selected edible seeds and their sprouts. *Volume 9 - 2022*. doi:10.3389/fnut.2022.1067597

- Liu, H., Zhang, Y.-H., Yin, H., Wang, W.-X., Zhao, X.-M., & Du, Y.-G. (2013). Alginate oligosaccharides enhanced *Triticum aestivum* L. tolerance to drought stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, 62, 33-40. doi:<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2012.10.012>
- Lv, H., Lin, L., Zhang, X., Li, R., Song, Y., Matsumoto, H., . . . Wang, G. J. N. c. (2021). Promoting exsolution of RuFe alloy nanoparticles on Sr₂Fe₁4RuO₁₀·10H₂O via repeated redox manipulations for CO₂ electrolysis. *12*(1), 5665.
- Maity, A., Natarajan, N., Vijay, D., Srinivasan, R., Pastor, M., & Malaviya, D. R. J. P. o. t. N. A. o. S., India Section B: Biological Sciences. (2018). Influence of metal nanoparticles (NPs) on germination and yield of oat (*Avena sativa*) and berseem (*Trifolium alexandrinum*). *88*(2), 595-607.
- Malerba, M., & Cerana, R. (2018). Recent Advances of Chitosan Applications in Plants. *10*(2), 118.
- Martínez-Flórez, S., González-Gallego, J., Culebras, J. M., & Tuñón, M. J. (2002). S. Martínez-Flórez, J. González-Gallego, J. M. Culebras* y M.^a J. Tuñón. *Nutrición Hospitalaria*.
- Martínez, B. M. E., Brown, A., & Coria, C. (2019). *Contenido de hierro, calcio y magnesio durante el proceso de producción de germinados de lentejas (lens culinaris) bajo cultivo aeropónico*. Universidad Nacional de Cuyo. Facultad de Ciencias Agrarias,
- Mayoral, J. B., Moreno, A. C., & Martínez, E. S. M. J. L.-A. J. o. P. E. (2014). Potencial zeta en la determinación de carga superficial de liposomas. *8*(4), 19.
- Mejia, A. C. (2022). Consideraciones en la producción de germinados para consumo humano. Retrieved from <https://www.editorialderiego.com/2022/08/consideraciones-en-la-produccion-de-germinados-para-consumo-humano/> (recuperado 10 de enero del 2025)
- Mikhailova, E. O. (2023). Selenium Nanoparticles: Green Synthesis and Biomedical Application. *28*(24), 8125.
- Miyahira, R. F., Lopes, J. d. O., & Antunes, A. E. C. (2021). The Use of Sprouts to Improve the Nutritional Value of Food Products: A Brief Review. *Plant Foods for Human Nutrition*, 76(2), 143-152. doi:10.1007/s11130-021-00888-6
- Molares, S., Ladio, A. J. E. B. C., & Medicine, A. (2012). The usefulness of edible and medicinal Fabaceae in Argentine and Chilean Patagonia: environmental availability and other sources of supply. *2012*(1), 901918.
- Moreno-Martín, G., Espada-Bernabé, E., Gómez-Gómez, B., LeónGonzález, M. E., & Madrid, Y. (2022). TRANSFORMACIONES METABÓLICAS DE NANOPARTÍCULAS DE SELENIO POR PLANTAS Y BACTERIAS MEDIANTE LA APLICACIÓN DE UNA PLATAFORMA MULTITÉCNICA. *SEQA, XXIII*, 57-63.
- Morgounov, A., Ozdemir, F., Keser, M., Akin, B., Payne, T., & Braun, H.-J. (2019). International Winter Wheat Improvement Program: history, activities, impact and future. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 6. doi:10.15302/J-FASE-2019261

- Moullick, D., Santra, S. C., Ghosh, D. J. E. s., & international, p. r. (2018). Seed priming with Se mitigates As-induced phytotoxicity in rice seedlings by enhancing essential micronutrient uptake and translocation and reducing As translocation. *25*(27), 26978-26991.
- NHANES. (2022). National Health and Nutrition Examination Survey. CDC.
- Noda-Leyva, Y., Pérez-Vásquez, A., & Valdés-Rodríguez, O. A. J. A. M. (2015). Establecimiento de tres especies de oleaginosas bajo asociación. *323-332*.
- Nutriterra. (2024). Quitosano: Un Aliado Natural para la Agricultura Sostenible. Retrieved from <https://nutriterra.com/quitosano-un-aliado-natural-para-la-agriculturasostenible/> (recuperado 15 de enero del 2025).
- Olson, K. R., Gao, Y., DeLeon, E. R., Arif, M., Arif, F., Arora, N., & Straub, K. D. (2017). Catalase as a sulfide-sulfur oxido-reductase: An ancient (and modern?) regulator of reactive sulfur species (RSS). *Redox Biology*, *12*, 325-339. doi:<https://doi.org/10.1016/j.redox.2017.02.021>
- OMS. (2021).
- Ordás, A. J. M. b. d. I. S. d. C. d. G. (2023). Los cereales. (23), 6.
- Ortega-Ortiz, H., Gaucin-Delgado, J. M., Preciado-Rangel, P., Fortis-Hernandez, M., Hernandez-Montiel, L. G., La CRUZ-LAZARO, E. D., & Lara-Capistran, L. J. N. B. H. A. C.-N. (2022). Copper oxide nanoparticles biosynthesized improve germination and bioactive compounds in wheat sprouts. *50*(1), 12657-12657.
- Orús, A. (2024). Los diez mayores productores de trigo a nivel mundial en 2023/2024. Retrieved from <https://es.statista.com/estadisticas/634804/principales-paises-productores-de-trigo-en-el-mundo/> (recuperado 10 de enero del 2025)
- Perez-Perez, L., García-Borbón, L., González Vega, R., Rodríguez-Figueroa, J., Rosas-Burgos, E., Huerta-Ocampo, J., . . . Del Toro, L. (2018). LIBERACIÓN DE COMPUESTOS FENÓLICOS LIGADOS EN EL GARBANZO (*Cicer arietinum* L.) UTILIZANDO MICROBIOTA HUMANA INTESTINAL. *Biotechnia*, *20*, 146-154. doi:10.18633/biotechnia.v20i3.722
- Pérez Galeano, A., & Zapata Valencia, S. (2015). *Evaluación del comportamiento comercial de los germinados y brotes tiernos en la ciudad de Medellín: posibles alternativas de comercialización*. Corporación Universitaria Lasallista,
- Ponce de Leon, C., Isasa, T., González, M., & García, P. (2023). Artículo Original Interés de los germinados y su Seguridad Alimentaria Interest of sprouts and their Food Security. doi:10.12873/401ponce
- Pyrzynska, K., & Sentkowska, A. J. J. o. N. i. C. (2022). Biosynthesis of selenium nanoparticles using plant extracts. *12*(4), 467-480.
- Radawiec, A., Szulc, W., & Rutkowska, B. (2021). Selenium Biofortification of Wheat as a Strategy to Improve Human Nutrition. *Agriculture*, *11*, 144. doi:10.3390/agriculture11020144
- Ramírez Rodríguez, S. C., Ortega Ortiz, H., Fortis Hernández, M., Nava Santos, J. M., Orozco Vidal, J. A., & Preciado Rangel, P. (2021). Nanopartículas de quitosano mejoran la calidad nutracéutica de germinados de triticale.

- Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(4), 579-589.
doi:10.29312/remexca.v12i4.2929
- Reyes-Zambrano, S., Lecona-Guzmán, C., Luján-Hidalgo, M., & Gutiérrez-Miceli, F. (2024). Stimulation of morphometric parameters and zinc content of native maize by priming with zinc oxide phytonanoparticles Estimulación de parámetros morfométricos y contenido de zinc en maíz nativo cebado con fitonanopartículas de óxido de zinc.
- Riseh, R. S., Vatankhah, M., Hassanisaadi, M., Tamanadar, E., Skorik, Y. J. A. i. N. S. N., & Nanotechnology. (2024). Nanocomposites in agriculture as pesticides for plant protection: a review. 15(2), 023003.
- Román-Doval, R., Torres-Arellanes, S. P., Tenorio-Barajas, A. Y., Gómez-Sánchez, A., & Valencia-Lazcano, A. A. (2023). Chitosan: Properties and Its Application in Agriculture in Context of Molecular Weight. 15(13), 2867.
- Rural, S. d. A. y. D. (2022). Cultivo de trigo en México: todo lo que debes de saber. Retrieved from https://www.gob.mx/agricultura/articulos/cultivo-de-trigo-en-mexico-todo-lo-que-debes-de-saber#:~:text=%20Se%20cultiva%20en%2014%20estados.%20*,toneladas.%20*%20Principales%20estados%20productores:%20*%20Sonora. (recuperado 10 de enero del 2025)
- Sabahat, S., Abbasi, J., Mumtaz, S., Tariq, S., Imran, M., Ahmad, M., & Khan, T. J. P. J. o. A. R. (2021). Role of micronutrients in improving fruit quality and yield of strawberry cv. chandler under microclimatic conditions. 34(4), 897-904.
- Salas-Pérez, L., Gaucín-Delgado, J. M., Preciado-Rangel, P., Fortis-Hernández, M., Valenzuela-García, J. R., & Ayala-Garay, A. V. J. R. M. d. C. A. (2016). Efecto del ácido benzoico en la capacidad antioxidante de germinados de trigo. (17), 3397-3404.
- Samynathan, R., Venkidasamy, B., Ramya, K., Muthuramalingam, P., Shin, H., Kumari, P. S., . . . Sivanesan, I. (2023). A Recent Update on the Impact of Nano-Selenium on Plant Growth, Metabolism, and Stress Tolerance. 12(4), 853.
- Sarraf, M., Vishwakarma, K., Kumar, V., Arif, N., Das, S., Johnson, R., . . . Hasanuzzaman, M. (2022). Metal/Metalloid-Based Nanomaterials for Plant Abiotic Stress Tolerance: An Overview of the Mechanisms. 11(3), 316.
- Schmidt Hebbel, H. (1980). Las especias (condimentos vegetales): su importancia en química y tecnología de alimentos y en el arte culinario.
- SENASICA. (2024). Servicio nacional de sanidad, inocuidad y calidad agroalimentaria.
- Senthamarai, M. D., Hillary, V. E., Rajan, M. R., & Ceasar, S. A. (2024). Biosynthesis of selenium nanoparticles and its biological applications: A systematic review. *Nano-Structures & Nano-Objects*, 39, 101261. doi:<https://doi.org/10.1016/j.nanoso.2024.101261>
- Sheikhalipour, M., Esmailpour, B., Behnamian, M., Gohari, G., Giglou, M. T., Vachova, P., . . . Skalicky, M. (2021). Chitosan–Selenium Nanoparticle (Cs–Se NP) Foliar Spray Alleviates Salt Stress in Bitter Melon. 11(3), 684.
- Shekari, F., Abbasi, A., & Mustafavi, S. H. (2017). Effect of silicon and selenium on enzymatic changes and productivity of dill in saline condition. *Journal of*

- the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 16(4), 367-374.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.jssas.2015.11.006>
- Siddiqui, S. A., Blinov, A. V., Serov, A. V., Gvozdenko, A. A., Kravtsov, A. A., Nagdalian, A. A., . . . Ibrahim, S. A. (2021). Effect of Selenium Nanoparticles on Germination of *Hordéum Vulgáre* Barley Seeds. 11(7), 862.
- Sindireva, A., Golubkina, N., Bezuglova, H., Fedotov, M., Alpatov, A., Erdenotsogt, E., . . . Caruso, G. (2023). Effects of High Doses of Selenate, Selenite and Nano-Selenium on Biometrical Characteristics, Yield and Biofortification Levels of *Vicia faba* L. Cultivars. 12(15), 2847.
- Singleton, V. L., Orthofer, R., & Lamuela-Raventós, R. M. (1999). [14] Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of folin-ciocalteu reagent. In *Methods in Enzymology* (Vol. 299, pp. 152-178): Academic Press.
- Srivastava, N., Mukhopadhyay, M. J. B., & engineering, b. (2015). Green synthesis and structural characterization of selenium nanoparticles and assessment of their antimicrobial property. 38(9), 1723-1730.
- Stockler-Pinto, M. B., Carrero, J. J., Weide, L. d. C. C., Cozzolino, S. M. F., & Mafra, D. J. N. h. (2015). Effect of selenium supplementation via Brazil nut (*Bertholletia excelsa*, HBK) on thyroid hormones levels in hemodialysis patients: a pilot study. 32(4), 1808-1812.
- Taghavi Fardood, S., Moradnia, F., Ramazani, A. J. M., & Letters, N. (2019). Green synthesis and characterisation of ZnMn₂O₄ nanoparticles for photocatalytic degradation of Congo red dye and kinetic study. 14(9), 986-991.
- Thepthanee, C., Li, H., Wei, H., Prakitchaiwattana, C., & Siriamornpun, S. (2024). Effect of Soaking, Germination, and Roasting on Phenolic Composition, Antioxidant Activities, and Fatty Acid Profile of Sunflower (*Helianthus annuus* L.) Seeds. 10(4), 387.
- Timberlake, K. C. (2013). *QUÍMICA GENERAL, ORGÁNICA Y BIOLÓGICA: Estructuras de la vida* (4ª edición ed.). México: Pearson.
- Trang, T. T. T., Zhang, J. H., Kim, J. H., Zargarani, A., Hwang, J. H., Suh, B. C., & Kim, N. J. (2018). Designing a magnesium alloy with high strength and high formability. *Nature Communications*, 9(1), 2522. doi:10.1038/s41467-018-04981-4
- Treviño López, E. A., Sandoval-Rangel, A., Benavides Mendoza, A., Benavides Mendoza, A., Ortega Ortiz, H., Cadenas Pliego, G., & Cabrera de la Fuente, M. (2021). Nanopartículas de selenio absorbidas en hidrogeles de quitosán-polivinil alcohol en la producción de pepino injertado. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 0(26), 159-169. doi:10.29312/remexca.v0i26.2946
- Valencia, M. E., Ronayne de Ferrerl, P., & Martín de Portela, M. J. R. F. (2013). Biodisponibilidad de nutrientes minerales. 18.
- Venereo Gutiérrez, J. R. (2002). Daño oxidativo, radicales libres y antioxidantes %J *Revista Cubana de Medicina Militar*. 31, 126-133.
- Villamil, J. M. P., & García, F. P. (1998). *Germinación de semillas*: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.

- Villaseñor-Mir, H. E., Borbón-Gracia, A., Solís-Moya, E., Alvarado-Padilla, J. I., Cruz-Cruz, E., Reyes-Muro, L., & Zamarripa-Colmenero, A. (2022). *Variedades de trigo del INIFAP* (Vol. Libro Técnico No. 3. 93 p.): Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Ciudad de México.
- Vogt, T. (2010). Phenylpropanoid Biosynthesis. *Molecular Plant*, 3(1), 2-20. doi:<https://doi.org/10.1093/mp/ssp106>
- Wang, Z., Wang, Y., Lü, J., Li, T., Li, S., Nie, M., . . . Zhao, X. (2024). Silicon and selenium alleviate cadmium toxicity in *Artemisia selengensis* Turcz by regulating the plant-rhizosphere. *Environmental Research*, 252, 119064. doi:<https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119064>
- Wei, M., Pan, A., Ma, R., & Wang, H. (2025). Migration characteristics and human health risk assessment of selenium and heavy metals in rhizosphere soil-crop system in high geological background area of southern Qinling Mountains: A case study of Shiquan County, Shaanxi, China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 294, 118013. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.118013>
- Wickens, A. P. (2001). Ageing and the free radical theory. *Respiration Physiology*, 128(3), 379-391. doi:[https://doi.org/10.1016/S0034-5687\(01\)00313-9](https://doi.org/10.1016/S0034-5687(01)00313-9)
- Xu, L., Li, Y., Cai, T., Zhang, J., He, L., Cai, R., . . . Shen, X. J. M. R. (2024). Energy storage enabled by cross-linked multilayer films using block copolymer-modified nanocapsules and chitosan biopolymers. 32(5), 453-465.
- Zhang, X., Liu, Y., Yong, H., Qin, Y., Liu, J., & Liu, J. (2019). Development of multifunctional food packaging films based on chitosan, TiO₂ nanoparticles and anthocyanin-rich black plum peel extract. *Food Hydrocolloids*, 94, 80-92. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.03.009>
- Zhao, D., Ma, H., Li, S., & Qi, W. J. B. P. B. (2024). Seed germination demonstrates inter-annual variations in alkaline tolerance: a case study in perennial *Leymus chinensis*. 24(1), 397.