

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN REGIONAL DE CIENCIA ANIMAL

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS BÁSICAS



Evaluación de la actividad antioxidante y antimicrobiana de extractos foliares de
Moringa oleifera frente a *Escherichia coli*

Por:

Ulises Guijón Torres

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

MÉDICO VETERINARIO ZOOTECNISTA

Torreón, Coahuila, México
Junio 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
UNIDAD LAGUNA
DIVISIÓN REGIONAL DE CIENCIA ANIMAL
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS BÁSICAS

Evaluación de la actividad antioxidante y antimicrobiana de extractos foliares de

Moringa oleifera frente a *Escherichia coli*

Por:

Ulises Guijón Torres

TESIS

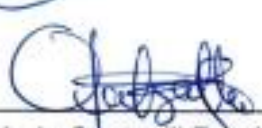
Que se somete a la consideración del H. Jurado Examinador como requisito parcial para
obtener el título de:

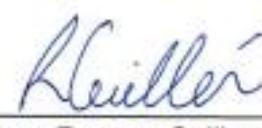
MÉDICO VETERINARIO ZOOTECNISTA

Aprobada por:


Dr. Juan Manuel Guillén Muñoz
Presidente


Dr. Ramiro González Avalos
Vocal


MC. Karla Quetzalli Ramírez Uranga
Vocal


Dra. Reyna Roxana Guillen Enríquez
Vocal suplente


MVZ. Eric Alejandro Reyes Ramírez
Coordinador de la División Regional de Ciencia Animal



Torreón, Coahuila, México
Junio 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
UNIDAD LAGUNA
DIVISIÓN REGIONAL DE CIENCIA ANIMAL
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS BÁSICAS

Evaluación de la actividad antioxidante y antimicrobiana de extractos foliares de
Moringa oleifera frente a *Escherichia coli*

Por:

Ulises Guijón Torres

TESIS

Presentado como requisito parcial para obtener el título de:

MÉDICO VETERINARIO ZOOTECNISTA

Aprobada por el Comité de Asesoría:



Dr. Ramiro González Avalos
Asesor Principal



MC. Karla Quetzalli Ramírez Uranga
Coasesor



Dra. Reyna Roxana Guillen Enríquez
Coasesor



MVZ. Eric Alejandro Reyes Ramírez
Coordinador de la División Regional de Ciencia Animal



Torreón, Coahuila, México
Junio 2026

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi alma mater **Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro** por brindarme la formación académica y profesional que hizo posible la realización de este trabajo. Expreso mi más sincero reconocimiento a mis asesores y sinodales por su orientación, apoyo y valiosas observaciones durante el desarrollo de esta investigación.

Principalmente a **Dra. Karla Quetzalli Ramírez, Dra. Reyna Guillen, Dr. Ramiro González, Dr. Pedro Robles Trillo** y una gran lista de profesores por compartir sus conocimientos y contribuir a mi formación como Médico Veterinario Zootecnista. Asimismo, a todos quienes colaboraron directa o indirectamente en la realización de este proyecto.

Finalmente, agradezco a mi **familia** por su apoyo incondicional, confianza y motivación constante a lo largo de esta etapa de mi vida.

DEDICATORIA

A **Dios**, por permitirme llegar hasta este momento y darme la fortaleza necesaria para superar cada desafío presentado durante mi formación profesional.

A mi **madre y su esposo, mis hermanas y hermanos**, por su apoyo incondicional, sus consejos y el esfuerzo que realizaron para motivarme en esta nueva carrera y encontrar mi vocación.

A mis **asesores y maestros**, por compartir sus conocimientos, orientación y experiencia, elementos que fueron fundamentales para mi desarrollo profesional y personal.

A mis **amigos y compañeros**, por acompañarme durante esta etapa, por las experiencias compartidas y por su apoyo en los momentos de dificultad.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	i
DEDICATORIA.....	ii
ÍNDICE GENERAL	iii
RESUMEN.....	v
ÍNDICE DE CUADROS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.2. Objetivos específicos.....	4
1.3. Hipótesis.....	4
2. REVISIÓN DE LITERATURA	5
2.1. Resistencia antimicrobiana: situación global.....	5
2.2. Importancia de <i>Escherichia coli</i> como patógeno de relevancia en salud pública y animal	6
2.2.1. Características generales y patotipos	7
2.2.2. Mecanismos de resistencia antimicrobiana	11
2.2.3. Importancia de <i>E. coli</i> en entornos pecuarios y su rol como reservorio de genes de resistencia.....	13
2.2.4. Métodos de evaluación de susceptibilidad bacteriana (difusión en agar y CMI)	15
2.3. Alternativas a los antibióticos: enfoque One Health	15
2.4. Plantas medicinales como fuente de compuestos bioactivos antimicrobianos	17
2.5. <i>Moringa oleifera</i> : taxonomía, distribución y composición fitoquímica general	18
2.6. Métodos de extracción y su influencia en el perfil fitoquímico de <i>M. oleifera</i>	20
2.7. Actividad antioxidante de <i>M. oleifera</i>	21
2.8. Actividad antimicrobiana de <i>M. oleifera</i> frente a <i>Escherichia coli</i>	23
2.9. Mecanismos de acción de los compuestos bioactivos de <i>M. oleifera</i>	28
3. MATERIALES Y MÉTODOS	31
3.1. Ubicación y condiciones del estudio.....	31
3.2. Diseño experimental	31
3.3. Obtención y preparación de extractos	32

3.3.1. Preparación y secado del material vegetal.....	32
3.3.2. Extracción por maceración.....	33
3.4. Variables evaluadas	34
3.4.1. Preparación de soluciones stock	34
3.4.2. Evaluación de la capacidad antioxidante (método DPPH).....	34
3.4.3. Diámetro de halo de inhibición	35
3.4. Análisis estadístico	35
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	37
4.1 Contenido de fenoles totales.....	37
4.2 Contenido de flavonoides totales	38
4.3 Actividad antimicrobiana frente a <i>Escherichia coli</i>	40
5. CONCLUSIONES	44
6. REFERENCIAS	45

RESUMEN

La resistencia antimicrobiana constituye uno de los principales problemas de salud pública y medicina veterinaria debido al incremento de microorganismos resistentes y a la disminución de las alternativas terapéuticas disponibles. En este contexto, *Moringa oleífera* ha despertado interés científico por su elevado contenido de compuestos bioactivos con propiedades antioxidantes y antimicrobianas. El objetivo de esta investigación fue evaluar la capacidad antioxidante y la actividad antimicrobiana de extractos foliares de *Moringa oleífera* obtenidos mediante diferentes solventes frente a *Escherichia coli*. Las hojas fueron sometidas a extracción por maceración utilizando etanol al 96% y etanol al 70%, posteriormente se determinaron fenoles totales, flavonoides totales, capacidad antioxidante mediante el método DPPH y actividad antibacteriana por difusión en agar. El extracto etanólico al 96% presentó los mayores contenidos de fenoles totales (102.96 mg GAE g⁻¹) y flavonoides totales (52.35 mg QE g⁻¹). En la evaluación antioxidante ambos extractos mostraron actividad dependiente de la concentración, registrándose el mayor porcentaje de inhibición del radical DPPH en el extracto hidroalcohólico al 70% a 200 µg/mL (57.3%). Respecto a la actividad antimicrobiana, ambos extractos inhibieron el crecimiento de *Escherichia coli*, observándose halos de inhibición entre 9.74 y 12.12 mm, siendo el extracto etanólico al 96% aplicado a 100 µL el que presentó el mayor efecto inhibitorio. Los resultados confirman que las hojas de *Moringa oleífera* constituyen una fuente importante de compuestos fenólicos y flavonoides con capacidad antioxidante y potencial antimicrobiano frente a *E. coli*, por lo que representan una alternativa

natural prometedora para el desarrollo de productos con aplicación farmacológica, veterinaria y alimentaria.

Palabras clave: Resistencia bacteriana, Metabolitos secundarios, Fenoles totales, Flavonoides totales, DPPH, One Health

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1 Contenido de fenoles totales en extractos foliares de Moringa oleifera.	37
Cuadro 2 Contenido de flavonoides totales en extractos foliares de Moringa oleifera.	38
Cuadro 3 Porcentaje de inhibición del radical DPPH por extracto y concentración.	39
Cuadro 4 Diámetro del halo de inhibición (mm) de los extractos foliares de Moringa oleifera frente a Escherichia coli ATCC 25922.....	40

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Patotipos intraintestinales de E. coli. Fuente: (Pokharel et al., 2023)	8
Figura 2. Patotipos intraintestinales (InPEC) y extraintestinales (ExPEC) de E. coli. Fuente: (Geurtsen et al., 2022)	9
Figura 3. Genoma de 29 muestras ambientales aisladas de E. coli. Fuente: (Saini et al., 2024)	15
Figura 4. Partes de árbol de Moringa oleífera: A) Hojas, B y D) Frutos y Semillas Fuente: (Olson & Fahey, 2011).....	19
Figura 5. Diferencias Antibioticos vs Peptidos Antimicrobianos. Fuente: (Tajer et al., 2024)	20
Figura 6. Cultivos de E. coli para aplicación de extracto de Moringa oleífera.	32
Figura 7. Halo de inhibición en cultivo de E. coli por extracto etanolico al 96% de moringa oleífera.	42

1. INTRODUCCIÓN

Las deficiencias en las prácticas de higiene y sanidad favorecen la aparición y permanencia de enfermedades infecciosas, situación que incrementa la dependencia del uso de fármacos antimicrobianos y antivirales dentro de los sistemas pecuarios y de salud pública, además, el empleo inadecuado de medicamentos, ya sea por dosis insuficientes, baja calidad o formulaciones con escasa concentración de principios activos, contribuye a tratamientos poco eficaces y facilita el desarrollo de resistencia en microorganismos patógenos, debido a que bacterias y parásitos poseen mecanismos adaptativos capaces de modificar rutas metabólicas, estructuras celulares y sistemas de defensa que les permiten sobrevivir frente a sustancias que anteriormente resultaban letales (Sirwan-Khalid *et al.*, 2024).

La resistencia antimicrobiana representa actualmente uno de los principales retos sanitarios a nivel mundial, tanto en medicina humana como veterinaria, debido a que el uso continuo y en ocasiones indiscriminado de antibióticos genera presión selectiva sobre los microorganismos, favoreciendo la aparición de cepas resistentes, por lo tanto, existe un interés creciente en la búsqueda de alternativas terapéuticas derivadas de compuestos naturales con menor impacto ambiental y con capacidad antimicrobiana demostrada (Sohaib *et al.*, 2021).

La resistencia a los antibióticos es uno de los fenómenos con mayor repercusión en la salud pública; en este contexto, el Centro Europeo para la Prevención y Control de Enfermedades estima que más de 670,000 infecciones anuales son causadas por bacterias resistentes, provocando aproximadamente 33,000 muertes directas,

de la misma manera, en Estados Unidos las bacterias multirresistentes generan alrededor de 2 millones de infecciones y 23,000 muertes al año, además de costos entre \$50 y \$70 billones; incluso, se prevé que para 2050 la resistencia antimicrobiana cause cerca de 10 millones de muertes anuales (Salerno *et al.*, 2022).

Dentro de este contexto, *Escherichia coli* destaca por su relevancia epidemiológica debido a su amplia distribución en animales de producción y por su capacidad para actuar como reservorio y transmisor de genes de resistencia antimicrobiana, además, el uso constante de antimicrobianos en sistemas pecuarios favorece la selección de cepas resistentes que posteriormente pueden llegar al consumidor final mediante alimentos de origen animal o contaminación ambiental (Silva *et al.*, 2023).

Ante esta problemática, diversas plantas medicinales han despertado interés científico por su contenido de metabolitos secundarios bioactivos, en particular *Moringa oleifera*, especie vegetal que ha mostrado propiedades antioxidantes, antiinflamatorias, antihipertensivas y antimicrobianas, además de efectos citoprotectores y potencial actividad frente a bacterias multirresistentes, lo que ha impulsado investigaciones orientadas a evaluar su posible aplicación terapéutica y nutracéutica (Soto *et al.*, 2025).

Los extractos foliares de *M. oleifera* contienen elevadas concentraciones de compuestos fenólicos y flavonoides asociados con una importante capacidad antioxidante, asimismo, diversos estudios han demostrado que la eficacia biológica de los extractos depende del método de extracción y del solvente utilizado,

destacando los solventes orgánicos por su mayor capacidad para recuperar metabolitos con actividad biológica (Vonghirundecha *et al.*, 2022).

Además, diferentes estudios *in vitro* han demostrado que los extractos de hojas de *M. oleífera* presentan actividad antimicrobiana frente a bacterias gramnegativas, incluyendo *E. coli*, mostrando efectos dependientes de la concentración y del método de extracción, aunque con variabilidad en los resultados, lo que indica que la eficacia antibacteriana no es uniforme y depende de factores como el solvente, la composición fitoquímica y la cepa bacteriana evaluada (Apenteng-Takyiako *et al.*, 2025; Tshabalala *et al.*, 2020).

Aunque el uso de *Moringa oleífera* está sumamente extendido para el tratamiento de diversas afecciones, aún se carece de evidencia científica sólida que respalde su inocuidad y no se han establecido protocolos claros para determinar el índice de bioseguridad de sus preparados herbales; por tal motivo, la presente investigación analiza la composición fitoquímica de sus extractos con el fin de validar su eficacia medicinal y explorar aplicaciones potenciales en sectores industriales como el cosmético y el alimentario (El-Sherbiny *et al.*, 2024).

1.1. Objetivo general

Determinar la capacidad antioxidante y el potencial antimicrobiano de los extractos obtenidos de las hojas de *Moringa oleífera* mediante pruebas *in vitro*, con el fin de evaluar su eficacia biológica frente a *Escherichia coli*.

1.2. Objetivos específicos

Cuantificar el contenido de compuestos bioactivos (como fenoles totales y flavonoides) en los extractos foliares de *Moringa oleífera* y medir su capacidad inhibición de radicales libres mediante métodos colorimétricos (como DPPH).

Evaluar la actividad antibacteriana en diferentes concentraciones del extracto foliar frente a cepas de *Escherichia coli* determinando parámetros críticos como la Concentración Mínima Inhibitoria (CMI) y el diámetro de los halos de inhibición.

1.3. Hipótesis

Los extractos foliares de *Moringa oleífera* contienen compuestos bioactivos con capacidad antioxidante y actividad antimicrobiana frente a *Escherichia coli*, lo que les confiere potencial como alternativa natural para aplicaciones veterinarias, farmacológicas y alimentarias.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Resistencia antimicrobiana: situación global

La resistencia antimicrobiana representa una amenaza creciente para la salud pública y la producción animal, debido a que numerosos microorganismos han desarrollado mecanismos adaptativos que disminuyen o anulan la eficacia de los antibióticos convencionales, provocando un incremento en la morbilidad, mortalidad y costos asociados con enfermedades infecciosas, impulsando la necesidad de desarrollar nuevas estrategias terapéuticas (Arip *et al.*, 2022). En este contexto, el uso sin control de antibióticos en humanos, animales y cultivos ha provocado un aumento crítico de bacterias súper resistentes, convirtiendo el control de infecciones en un desafío médico sin precedentes (Elshobary *et al.*, 2025).

Durante décadas, los antibióticos fueron utilizados no solamente con fines terapéuticos sino también como promotores de crecimiento y medidas profilácticas dentro de la producción pecuaria, sin embargo, esta práctica favoreció la selección de microorganismos resistentes capaces de sobrevivir bajo presión antimicrobiana, por lo tanto, las bacterias desarrollaron mecanismos de resistencia tanto intrínseca como adquirida que actualmente limitan considerablemente las opciones terapéuticas disponibles (Rizzo *et al.*, 2022).

El empleo irracional de antibióticos, así como las prescripciones inadecuadas y las dosis insuficientes, contribuyen a la dispersión de genes de resistencia en diferentes ambientes, incluyendo aguas residuales, residuos pecuarios y suelos agrícolas, además, diversos reservorios biológicos y ambientales participan en la transmisión de estos genes resistentes, mientras que elementos genéticos como los integrones

facilitan el intercambio de información genética entre bacterias, por lo que resulta indispensable implementar medidas de control ambiental y promover diagnósticos y prescripciones basadas en evidencia científica tanto en medicina humana como veterinaria (Zhang *et al.*, 2020).

Diversos factores adicionales también han favorecido la resistencia antimicrobiana, entre ellos la disminución en el descubrimiento de nuevos antibióticos, el uso indiscriminado de compuestos antimicrobianos en productos comerciales y la capacidad de las bacterias para formar biopelículas protectoras, por ello, actualmente se investigan nuevas alternativas terapéuticas como péptidos antimicrobianos, probióticos, bacteriófagos, compuestos vegetales y nanopartículas con potencial antimicrobiano (Berger & Loewy, 2024).

La resistencia a los antibióticos se ha convertido en un tema de gran relevancia para la salud pública, por lo que las investigaciones encaminadas al control de la resistencia requieren fortalecer la capacidad para predecir cómo y cuándo evolucionará. En este sentido, las interacciones epistáticas entre mutaciones pueden originar diferentes trayectorias evolutivas, dificultando la predicción de la evolución de *Escherichia coli* y otros microorganismos resistentes (Card *et al.*, 2020).

2.2. Importancia de *Escherichia coli* como patógeno de relevancia en salud pública y animal

De acuerdo con diversos estudios, *Escherichia coli* es considerado uno de los principales patógenos involucrados tanto en infecciones comunitarias como nosocomiales, siendo responsable de infecciones del tracto urinario, gastroenteritis,

infecciones respiratorias, bacteriemias y heridas quirúrgicas, de la misma forma, en los últimos años se ha observado un incremento en la prevalencia de cepas productoras de betalactamasas de espectro extendido, situación que ha elevado su relevancia clínica y epidemiológica debido a su relación con fenómenos de resistencia antimicrobiana y limitaciones terapéuticas (Miranda-García, 2013).

Aunque numerosos estudios han reportado información relevante sobre la resistencia a los antibióticos en *Escherichia coli* y los genes implicados, muchos se han enfocado únicamente en genes, ambientes o áreas específicas, o bien en cepas aisladas de infecciones clínicas humanas, lo que ha limitado la comprensión integral de los mecanismos de resistencia, por ello, resulta necesaria una investigación global sobre la distribución y transmisión de esta bacteria para comprender mejor sus mecanismos de resistencia, fortalecer las estrategias de control y optimizar la toma de decisiones en salud pública y tratamientos antimicrobianos (Qing *et al.*, 2024).

2.2.1. Características generales y patotipos

Escherichia coli es una bacteria gram negativa ampliamente distribuida en el ambiente y en el tracto gastrointestinal de animales y humanos, que comprende cepas tanto comensales como patógenas, además de esto, las cepas comensales poseen capacidad de adaptación a distintos huéspedes y condiciones ambientales, pudiendo evolucionar hacia formas patógenas responsables de enfermedades gastrointestinales y extraintestinales, como diarreas e infecciones urinarias (Naidoo & Zishiri, 2025), adicionalmente, su capacidad para formar biopelículas y regular

factores de virulencia mediante quorum sensing favorece su persistencia y resistencia frente a tratamientos antimicrobianos (Bhandari *et al.*, 2021).

Algunas cepas de *E. coli* pueden ser administradas con efecto probiótico y son reconocidas por sus efectos positivos en la salud de los pacientes, sin embargo algunas cepas pueden ser patogénicas, causando enfermedades intestinales y extra intestinales tanto en humanos como animales, denotando ser una bacteria con una amplia variedad y tipos naturales de cepas, con características distintas cada una, debido a sus cualidades únicas, facilidad de manejo, disponibilidad de su secuencia genómica y su capacidad para desarrollarse tanto en condiciones aeróbicas como anaeróbicas (Basavaraju & Gunashree, 2022).

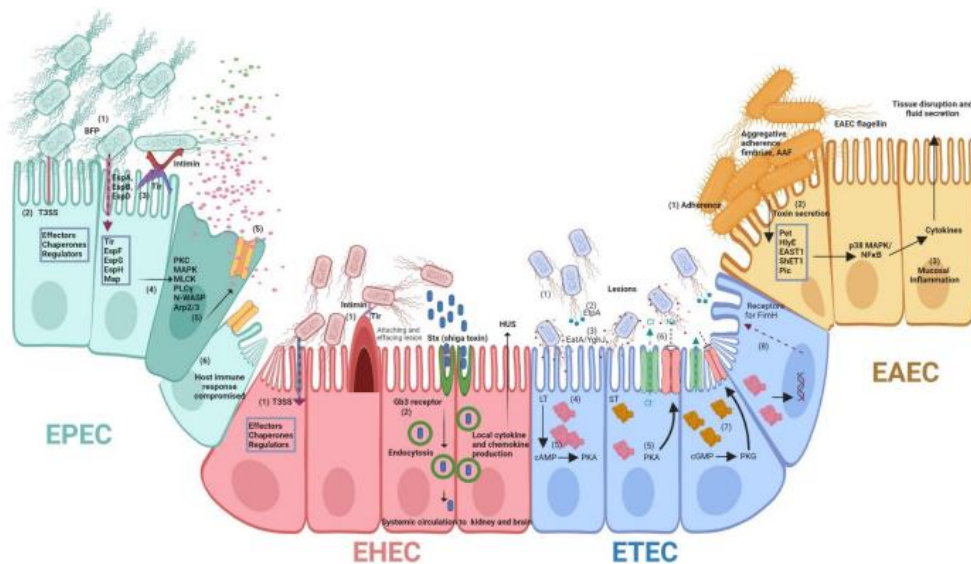


Figura 1. Patotipos intrainstestinales de *E. coli*. Fuente: (Pokharel *et al.*, 2023).

Las cepas de *E. coli* pueden clasificarse en extraintestinales (ExPEC) o intrainstestinales (InPEC); de las cuales, InPEC engloba seis grupos patógenos; enteropatógena (EPEC), enterotoxigénica (ETEC), enteroinvasiva (EIEC),

enteroagregativa (EAEC), enterohemorrágica (EHEC) y de adherencia difusa (DAEC), asimismo, poseen varios factores de virulencia que son una combinación de características que las distinguen ya que afectan una amplia gama de procesos celulares en los patógenos, entre ellos, los 2 principales que resaltan por causar diarrea en el intestino son; adhesión y colonización y las exotoxinas, estos a su vez son cruciales para que superen el sistema inmunitario y generen resistencia (Naidoo & Zishiri, 2025)

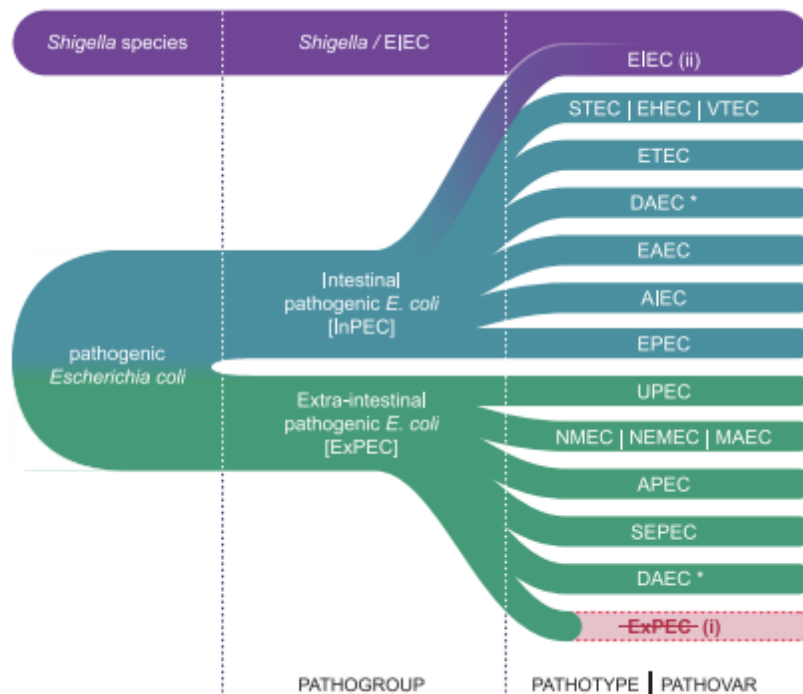


Figura 2. Patotipos intraintestinales (InPEC) y extraintestinales (ExPEC) de *E. coli*.
Fuente: (Geurtsen *et al.*, 2022).

Entre los diferentes patógenos, *Escherichia coli* ha adquirido gran relevancia debido a que las cepas patógenas extraintestinales pueden actuar como reservorios de genes de resistencia antimicrobiana los cuales son susceptibles de transferirse a

bacterias patógenas u oportunistas, por lo que, estas cepas poseen una elevada capacidad de adaptación y pueden ocasionar infecciones en sitios extraintestinales, incluyendo infecciones del tracto urinario, torrente sanguíneo, próstata y otros tejidos (Sora *et al.*, 2021).

Las cepas patógenas de *E. coli* poseen diversos factores de virulencia y mecanismos de patogenicidad que les permiten adaptarse y causar enfermedad en distintos hospedadores, por lo que, para su identificación y monitoreo preciso, resulta fundamental el uso de tecnologías como la secuenciación de nueva generación y la proteómica, ya que estas herramientas permiten obtener información detallada sobre sus perfiles de virulencia; asimismo, aunque se han identificado numerosos factores asociados con la patogenicidad de *E. coli*, aún es necesario ampliar las investigaciones para descubrir nuevos mecanismos de virulencia que contribuyan al desarrollo de mejores estrategias de control, tratamientos e inmunización frente a esta bacteria (Mudau *et al.*, 2025).

Los criterios microbiológicos para alimentos diferencian las cepas patogénicas en base a las matrices alimentarias, como consecuencia, teniendo tolerancia cero a la mayoría de alimentos para consumo debido al alto grado de enfermedad que representa, en particular las cepas productoras de la toxina Shiga, la cual puede tener severos efectos negativos en humanos como el síndrome urémico hemolítico y puede llegar a la muerte en personas susceptibles, por lo que debería incorporar medidas para la detección de estos serotipos en los criterios de alimentos (Alhadlaq *et al.*, 2024).

Entre las cepas de *E. coli* productoras de toxina Shiga, resaltan aquellas que tienen en su isla de patogenicidad el Locus de Adhesión y Agregación el cual le confiere la capacidad de adherirse a las paredes intestinales y el cual está relacionado a enfermedades severas y que existen diferentes fuentes de contaminación como el ganado, instalaciones de la granja y alimentos (Colello *et al.*, 2018).

Diversos estudios han reportado que cepas de *Escherichia coli* aisladas de becerros con diarrea presentan una amplia variedad de factores de virulencia y genes asociados con resistencia antimicrobiana, destacando los serogrupos O26 y O157 como los más frecuentes; asimismo, se ha documentado resistencia frente a antibióticos como penicilina, estreptomicina, tetraciclina, ampicilina, sulfametoxazol y fluoroquinolonas, esto evidencia la creciente problemática de multirresistencia bacteriana, adicionalmente, estas características pueden variar según factores geográficos, estacionales y etarios, por lo que resulta fundamental promover un uso prudente de antibióticos e implementar métodos para la evaluación de susceptibilidad antimicrobiana (Shahrani, 2014).

2.2.2. Mecanismos de resistencia antimicrobiana

Tras décadas de uso de antibióticos, *E. coli* pasó de considerarse una bacteria relativamente inofensiva a representar nuevamente un riesgo importante para la salud humana, debido a su capacidad natural para adquirir material genético de otras bacterias, favoreciendo la aparición de cepas multirresistentes desde el inicio de la era antibiótica, además, el uso continuo de antimicrobianos ejerció una presión selectiva que promovió la persistencia y selección de nuevas cepas resistentes, las

cuales adquirieron mecanismos de resistencia mediante transferencia horizontal de genes o mutaciones espontáneas (Nasrollahian *et al.*, 2024).

Gracias a su enorme capacidad para transferir resistencia a los antibióticos a otros microorganismos y adquirirla de bacterias presentes en el mismo ambiente, *E. coli* posee una importante ventaja evolutiva, debido a que, los genes de resistencia suelen localizarse en plásmidos, los cuales facilitan la transferencia horizontal entre diferentes bacterias, incluyendo aquellas consideradas una amenaza para la medicina. Además, una misma cepa puede contener genes de resistencia contra múltiples grupos de antibióticos, complicando considerablemente el tratamiento de infecciones bacterianas (Puvača & de Llanos Frutos, 2021).

Los resultados obtenidos por Peñaloza y Aspiazu (2021) concluyen que *Escherichia coli* en América Latina presenta diversos genes asociados a la resistencia frente a betalactámicos y quinolonas, donde la producción de BLEE constituye el principal mecanismo de resistencia a betalactámicos, destacando los genes CTX-M-15 y CTX-M-2 como los grupos circulantes predominantes; además, la resistencia a quinolonas ocurre tanto por mutaciones cromosómicas como por mecanismos mediados por plásmidos, siendo este último el más frecuente debido a la expresión de los genes *aac(6')-Ib-cr* y *qnrB*.

La generación de resistencia en bacterias se debe diversos mecanismos que provocan un errores en la replicación del ADN, los cuales son capaces de provocar una respuesta al estrés, con esto logrando una tasa de mutación que puede provocar mutantes resistentes, que pueden ser los siguientes; disminución de la acumulación intracelular, hidrolisis o modificación, eliminación activa por bombas de

expulsión, protección, alteración o hiperproducción de la diana y la aparición de nuevas vías metabólicas que sustituyen las que son bloqueadas por efecto del antibiótico (Martínez, 2016).

El sistema de comunicación molecular conocido como quorum sensing (QS), encargado de regular coordinadamente la expresión génica poblacional, la virulencia y la formación de biopelículas, se ha consolidado como un objetivo terapéutico prometedor para el desarrollo de estrategias antivirulencia, por lo que, dichas estrategias buscan interrumpir la comunicación bacteriana para reducir la capacidad patogénica de los microorganismos sin ejercer una acción bactericida directa sobre las células (Papanephytou, 2026).

2.2.3. Importancia de *E. coli* en entornos pecuarios y su rol como reservorio de genes de resistencia

La comparación de cepas multirresistentes de *Escherichia coli* aisladas de diferentes fuentes mostró una mayor prevalencia en muestras de origen animal y ambiental respecto a las humanas, asimismo, la prevalencia de cepas productoras de betalactamasas de espectro extendido determinada mediante concentración mínima inhibitoria fue de 42.4% en aislamientos humanos, 63.2% en animales y 28.6% en muestras ambientales o alimentarias, mientras que mediante difusión en disco se registraron prevalencias de 13%, 26.3% y 25%, respectivamente, evidenciando una mayor frecuencia de resistencia antibiótica en aislamientos de origen animal (Pormohammad *et al.*, 2019).

Los péptidos antimicrobianos resaltan como una estrategia prometedora contra patógenos resistentes a fármacos debido a que, al ser oligopéptidos de bajo peso

molecular, presentan actividad frente a diversos microorganismos patógenos. Además, al no actuar de manera específica sobre un único blanco celular, facilitan la respuesta inmune y funcionan como mecanismos de defensa de primera línea contra microorganismos invasores, por ello, su diversidad y potencia los posicionan como una alternativa terapéutica relevante, pudiendo utilizarse solos o en combinación con otros biocomponentes para mejorar la respuesta terapéutica (Mba & Nweze, 2022).

El análisis genómico de Saini et al. (2024) obtuvo 29 aislamientos ambientales de *Escherichia coli*, el cual, reveló una importante diversidad genética, evidenciada por la identificación de 17 tipos de secuencia diferentes; además, el estudio del pangenoma mostró genes asociados con funciones esenciales como metabolismo, síntesis de proteínas, producción de energía y mecanismos de defensa, mientras que los análisis comparativos indicaron una alta similitud genómica entre los aislamientos, aunque las regiones variables se relacionaron principalmente con elementos genéticos móviles y los aislamientos del mismo filogrupo tendieron a agruparse independientemente de su origen.

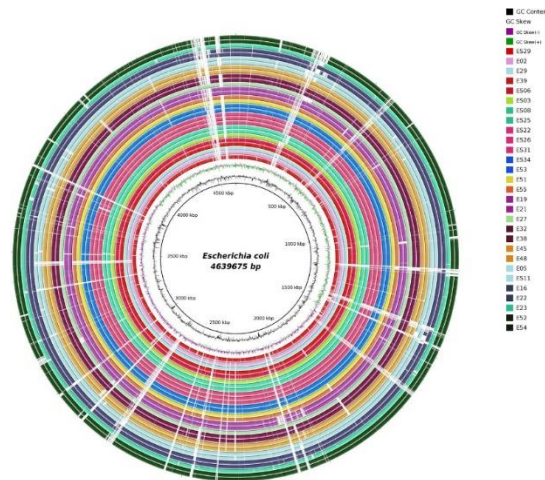


Figura 3. Genoma de 29 muestras ambientales aisladas de *E. coli*. Fuente: (Saini *et al.*, 2024).

2.2.4. Métodos de evaluación de susceptibilidad bacteriana (difusión en agar y CMI)

La evaluación de la susceptibilidad bacteriana es esencial para determinar la efectividad de los antimicrobianos frente a microorganismos patógenos; para ello, se emplean principalmente métodos como la difusión en agar y la concentración mínima inhibitoria (CMI), los cuales permiten analizar cepas resistentes y productoras de betalactamasas de espectro extendido, mientras que diversos estudios han evidenciado variaciones en los patrones de sensibilidad y resistencia según la metodología utilizada, destacando la necesidad de aplicar técnicas estandarizadas para una correcta interpretación de los perfiles de resistencia bacteriana (Pormohammad *et al.*, 2019).

2.3. Alternativas a los antibióticos: enfoque One Health

En los últimos años se ha observado un notable incremento en el interés por los fármacos de origen vegetal gracias a sus propiedades beneficiosas; sin embargo, resulta imperativo profundizar en las investigaciones para comprender íntegramente

sus mecanismos de acción y validar la seguridad de los fitoquímicos con potencial antimicrobiano, en este contexto, las perspectivas futuras se enfocan en optimizar el aprovechamiento de metabolitos secundarios de plantas en la lucha contra patógenos resistentes a los antibióticos (Angelini, 2024).

Las vacunas son esenciales para prevenir enfermedades infecciosas, ya que brindan inmunidad duradera y representan una alternativa más económica que el tratamiento de las infecciones, no obstante, el desarrollo de vacunas contra *Escherichia coli* ha sido limitado debido a diversas barreras científicas y económicas, aunque la creciente resistencia antimicrobiana podría impulsar su investigación, por lo cual, se han desarrollado distintas estrategias vacunales utilizando componentes bacterianos como antígenos, fimbrias y proteínas de membrana, aunque la mayoría aún se encuentran en etapa experimental (Pokharel *et al.*, 2023).

Además, estos compuestos presentan ventajas adicionales como menor toxicidad relativa, biodegradabilidad y potencial de uso en sistemas sostenibles, lo que los posiciona como alternativas viables dentro del enfoque One Health para el control de enfermedades infecciosas (Klimek-Szczykutowicz *et al.*, 2024).

Algunos tratamientos como la exposición a luz ultravioleta, oxidación superficial con plasma y biocarbon han demostrado resultados efectivos para eliminar cepas de *E. coli* resistentes a antibióticos, de igual forma, se han estudiado otras alternativas con potencial para combatir *E. coli*, tales como probióticos, extractos de plantas y péptidos antimicrobianos (Xu *et al.*, 2022).

Los compuestos fenólicos son metabolitos secundarios presentes en plantas y alimentos como frutas, verduras y bebidas, donde participan en la defensa contra patógenos y aportan efectos antioxidantes, antiinflamatorios y antiproliferativos beneficiosos para la salud humana y animal, y entre éstos, sus principales grupos destacan los ácidos fenólicos, taninos, lignanos y flavonoides, siendo estos últimos los más abundantes y reconocidos por sus propiedades antifúngicas, antibacterianas, antivirales, neuroprotectoras y anticancerígenas, además de su potencial aplicación farmacéutica, nutracéutica y cosmética (Sun & Shahrajabian, 2023).

2.4. Plantas medicinales como fuente de compuestos bioactivos antimicrobianos

Las plantas medicinales representan una fuente importante de compuestos bioactivos con actividad antimicrobiana, destacando metabolitos como flavonoides, ácidos fenólicos, alcaloides y terpenoides, los cuales han demostrado capacidad para inhibir el crecimiento bacteriano mediante diversos mecanismos celulares y moleculares (Davidova *et al.*, 2024). Estos compuestos presentan la ventaja de actuar de manera multitarget, afectando simultáneamente diferentes estructuras y procesos celulares bacterianos, lo que disminuye la probabilidad de que los microorganismos desarrollen resistencia en comparación con los antibióticos convencionales de acción específica (Nazzaro *et al.*, 2017).

Los aceites esenciales y sus componentes ejercen actividad antimicrobiana mediante la alteración de la membrana celular, la inhibición de procesos energéticos y proteínas bacterianas, así como la interferencia con ácidos nucleicos, bombas de

expulsión y mecanismos de virulencia como quorum sensing y formación de biopelículas (El-Sakhawy *et al.*, 2026). Asimismo, la combinación de compuestos vegetales con antimicrobianos convencionales puede disminuir la resistencia bacteriana y potenciar el efecto terapéutico con dosis menores, resaltando su potencial en el desarrollo de nuevas estrategias contra infecciones asociadas a biofilms (Bonincontro *et al.*, 2021).

2.5. *Moringa oleifera*: taxonomía, distribución y composición fitoquímica general

Moringa oleifera es un árbol perenne perteneciente a la familia *Moringaceae* y al género *Moringa*, es originario de las regiones subhimaláicas del subcontinente indio y ampliamente distribuido en zonas tropicales y subtropicales por su rápido crecimiento y tolerancia a la sequía, también llamada “árbol milagroso”, esta especie destaca por su elevado valor nutricional y fitoquímico, ya que sus hojas, vainas y tallos contienen proteínas, vitaminas A, B, C y E, minerales, carotenoides y aminoácidos azufrados como cisteína y metionina, además, posee bajo contenido de factores antinutricionales y taninos, favoreciendo su uso tanto en la alimentación humana como animal y le confiere potencial funcional y medicinal (Singh, 2018).

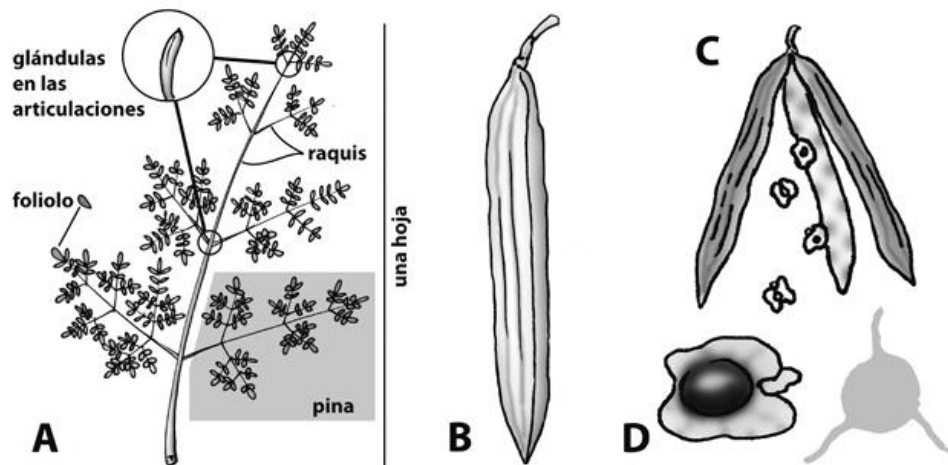


Figura 4. Partes de árbol de *Moringa oleífera*: A) Hojas, B y D) Frutos y Semillas
Fuente: (Olson y Fahey, 2011).

Moringa oleífera es una planta multipropósito con gran potencial para disminuir el uso de suplementos proteicos convencionales debido a su fácil propagación y baja demanda de agua y nutrientes, además, contiene la mayoría de los nutrientes esenciales necesarios para el mantenimiento y la producción animal, aportando macro y micronutrientes que mejoran el valor nutritivo de los alimentos, gracias a ello, ha sido utilizada como suplemento en especies productivas y aves de corral, incrementando la producción y calidad de carne y leche, así como su vida útil en anaquel (Mallenakuppe *et al.*, 2019).

Investigaciones farmacológicas han confirmado las propiedades antiinflamatorias presentes en extractos de diversos órganos de esta planta, demostrando que sus componentes bioactivos se distribuyen integralmente en toda su estructura, de modo que, hasta el momento se han identificado más de un centenar de fitocompuestos en *Moringa oleífera*, entre los que destacan alcaloides, antraquinonas, vitaminas, glucósidos y terpenos, además de compuestos aislados

recientemente como muramosidas A y B y niaziminas A y B, los cuales exhiben propiedades antioxidantes, antitumorales, antihipertensivas y nutricionales (Pareek *et al.*, 2023).

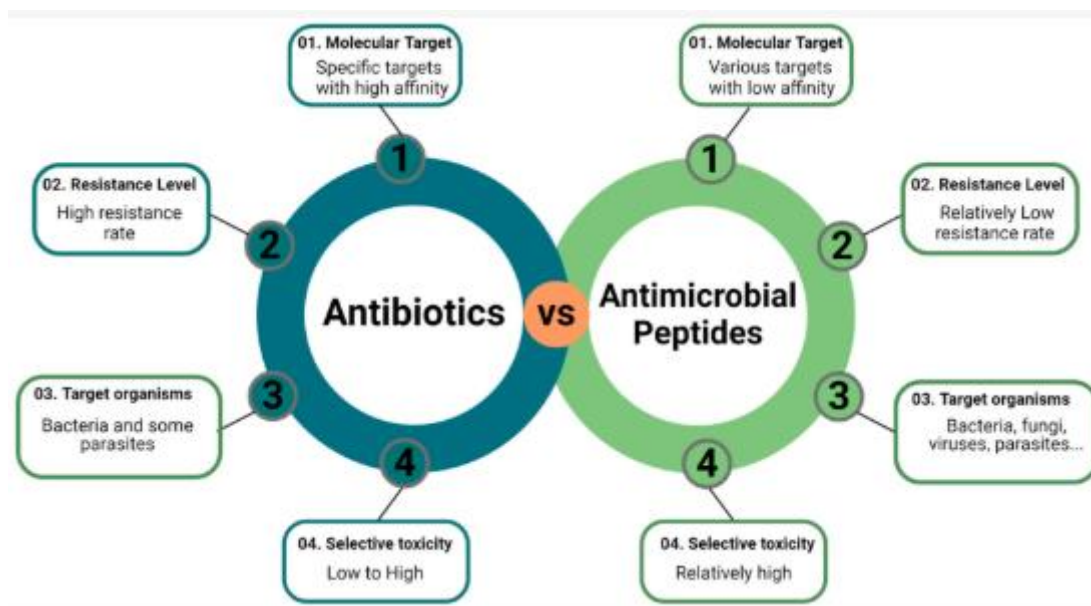


Figura 5. Diferencias Antibioticos vs Peptidos Antimicrobianos. Fuente: (Tajer *et al.*, 2024).

Las hojas de esta planta representan una de las principales fuentes de compuestos funcionales, concentrando una gran diversidad de metabolitos secundarios identificados mediante técnicas analíticas avanzadas, lo que evidencia su potencial como fuente de moléculas con actividad antioxidante y antimicrobiana (Rocchetti *et al.*, 2020).

2.6. Métodos de extracción y su influencia en el perfil fitoquímico de *M. oleifera*

El contenido fitoquímico y la capacidad antioxidante de las hojas frescas de *Moringa oleifera* dependen tanto de la madurez de la hoja como del tipo de solvente empleado para su extracción, siendo los 45 días la edad óptima para obtener la

mayor potencia biológica, de la misma manera, el uso de agua como solvente produce niveles más bajos de compuestos y actividad biológica, concluyendo que, en términos de eficiencia, el etanol destaca para la obtención de flavonoides y el metanol para polifenoles, superando ambos solventes orgánicos al extracto acuoso en rendimiento y eficacia antioxidante (Nobosse *et al.*, 2018).

El potencial antioxidante de los extractos de *Moringa oleifera* fue evaluado mediante pruebas de captura de radicales libres DPPH, además de analizar sus propiedades trombolíticas y antibacterianas, de modo que, las diferentes fracciones mostraron la presencia de compuestos bioactivos como flavonoides, taninos, saponinas, glucósidos y terpenoides, también, algunas fracciones presentaron elevada actividad antioxidante y actividad antimicrobiana frente a los microorganismos evaluados, mientras que la fracción acuosa destacó por su mayor capacidad trombolítica (Amees *et al.*, 2023).

En el estudio de Vonghirundecha *et al.* (2022) se obtuvieron microcapsulas bajo dos métodos distintos preparados en maltodextrina bajo secado por aspersión, mostraron un bajo contenido de humedad y actividad en agua además de un buen índice de solubilidad, además de la eficacia de los procedimientos de encapsulación, demostró la bioaccesibilidad y estabilidad de almacenamiento del extracto en microcapsulas, en los cuales se destacaron los compuestos antioxidantes presentes en ellos.

2.7. Actividad antioxidante de *M. oleifera*

Los extractos foliares de *Moringa oleifera* han mostrado elevada actividad antioxidante en diversos estudios *in vitro*, evidenciada mediante ensayos,

denotando su capacidad para neutralizar radicales libres y prevenir el daño oxidativo en sistemas biológicos (Zhao *et al.*, 2019). Además, la actividad antioxidante puede variar según el método de extracción, siendo los extractos hidroalcohólicos los que presentan mayor capacidad antioxidante debido a su elevado contenido de compuestos polares (Liga *et al.*, 2025).

Algunos otros compuestos adicionales como carotenoides, vitaminas antioxidantes (A y C) y compuestos sulfurados le brindan a *Moringa oleífera* una gran capacidad para neutralizar actividad de radicales libres, adaptar rutas para señalización celular y mitigar el impacto del estrés oxidativo, el cual es considerado un factor clave para el desarrollo de patologías cardiovasculares, neurodegenerativas, cardiovasculares y oncológicas, por lo que su uso tanto en medicina humana como veterinaria podría ayudar a disminuir estos riesgos (Martínez *et al.*, 2025).

Investigaciones adicionales han señalado que *Moringa oleífera* ha sido utilizada en medicina tradicional debido a la presencia de compuestos bioactivos, especialmente flavonoides y polifenoles asociados a múltiples efectos biológicos, entre ellos, destaca la actividad antiinflamatoria atribuida a compuestos como quercetina y kaempferol, capaces de inhibir enzimas proinflamatorias como ciclooxigenasa y lipoxigenasa, mientras que los isotiocianatos participan en la regulación de vías inflamatorias como NF-kappa B, disminuyendo la producción de citocinas proinflamatorias como TNF- α e IL-1 β (Chis *et al.*, 2024).

La actividad antioxidante desempeña un papel fundamental en la protección celular frente a los procesos de oxidación; en este contexto, los compuestos antioxidantes presentes en las hojas de *Moringa oleífera* pueden contribuir a la fotoprotección

contra el estrés oxidativo inducido por la exposición a radiación ultravioleta, la cual, tras exposiciones prolongadas, puede favorecer el desarrollo de cáncer de piel (Peñalver *et al.*, 2022).

Los extractos de *Moringa* contienen una amplia variedad de compuestos fitoquímicos con potencial terapéutico contra distintas enfermedades; de la misma forma, el extracto metanólico de las hojas presenta una elevada concentración de compuestos fenólicos y una actividad antioxidante comparable a la del antioxidante sintético BHT, además, diferentes extractos de esta misma han demostrado actividad antimicrobiana frente a bacterias Gram positivas como *Staphylococcus aureus* y *Bacillus cereus*, así como frente a bacterias Gram negativas como *Escherichia coli* y *Klebsiella pneumoniae* (Shaymaa *et al.*, 2021).

Las propiedades antioxidantes de los extractos de *Moringa*, muestran áreas de oportunidad en la industria cosmética, principalmente en aquellos productos para protección de la piel como el daño oxidativo y envejecimiento, por lo cual, estos extractos podrían ser integrados como conservadores naturales en productos alimenticios con la finalidad de extender su vida en anaquel al mitigar la oxidación y su deterioro, ofreciendo una alternativa a los conservadores sintéticos (Herman-Lara *et al.*, 2024).

2.8. Actividad antimicrobiana de *M. oleifera* frente a *Escherichia coli*

Diversos estudios han demostrado que los extractos foliares de *Moringa oleifera* poseen actividad antimicrobiana frente a cepas patógenas y multirresistentes de *Escherichia coli*, incluidas variantes productoras de betalactamasas de espectro extendido (ESBL), a su vez, se ha reportado que compuestos fenólicos presentes

en las hojas, como el ácido ferúlico, podrían contribuir a este efecto mediante interacciones con enzimas bacterianas relacionadas con supervivencia y virulencia microbiana (Allam *et al.*, 2024).

Se pueden encontrar diversos componentes con potencial antimicrobiano en *Moringa oleífera*, de los cuales, la concentración mínima inhibitoria y concentración mínima bactericida varían dependiendo de que parte de la planta se obtenga el extracto, de modo que, los extractos de las hojas, corteza y raíces tienen actividad bacteriostática en *E. coli*, mientras que el extracto obtenido de las semillas tiene actividad bactericida contra la misma, lo cual está relacionado a la diversidad de moléculas con efecto antimicrobiano, así como sus niveles de concentración de una parte de la planta a otra (Metsopkeng *et al.*, 2022).

En el estudio de Cheng *et al.* (2019) se realizaron pruebas de microdilución en caldo para determinar la concentración mínima inhibitoria y bactericida del extracto de *Moringa oleífera*, obteniéndose valores entre 12.5 y 50 mg/mL en 18 de 27 aislamientos bacterianos evaluados, a su vez, el tratamiento de cepas de *Escherichia coli* O55 con extracto de moringa redujo la adhesión e invasión en células MAC-T mediante la disminución de genes asociados a factores de adhesión como papC, f17c-A y eaeA; asimismo, el pretratamiento celular durante 12 horas disminuyó significativamente la adhesión e invasión de *E. coli* O55 y *Enterococcus faecalis* (Cheng *et al.*, 2019).

El extracto metanólico de hojas de *Moringa oleífera* ha demostrado potencial antibacteriano frente a diversos microorganismos patógenos, sugiriendo su posible utilidad en infecciones causadas por *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus* y

Streptococcus pneumoniae, finalmente, éstos resultados respaldan la necesidad de continuar investigando sus propiedades antimicrobianas para profundizar en el conocimiento de sus compuestos bioactivos y su posible aplicación terapéutica frente a infecciones bacterianas (Idris & Abubakar, 2016).

En pruebas realizadas por Apenteng-Takyako et al. (2025), los extractos de hojas y semillas de *Moringa oleifera* también mostraron actividad antimicrobiana frente a bacterias resistentes a antibióticos, destacando principalmente los extractos acuosos, concretamente, en cepas de *Escherichia coli* productoras de betalactamasas de espectro extendido, el extracto acuoso de hojas presentó halos de inhibición de hasta 28.4 mm y mayor actividad frente a cepas resistentes a meropenem, mientras que los extractos etanólicos y de éter de petróleo mostraron poca o nula actividad.

Sin embargo, la actividad antimicrobiana reportada es variable, ya que algunos extractos presentan efectos moderados o limitados, indicando que su eficacia depende de factores experimentales y que no debe asumirse como un efecto universal, por ello, resulta necesario realizar evaluaciones estandarizadas que permitan determinar con mayor precisión el potencial antimicrobiano de estos extractos bajo condiciones controladas (Segwatibe et al., 2023; Sharma et al., 2020).

En términos generales, los extractos acuosos de hojas de *Moringa oleifera* al 2% mostraron la mayor eficacia para inhibir el crecimiento de patógenos transmitidos por alimentos inoculados experimentalmente en albóndigas de carne, incluyendo *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella enterica* serovar Typhimurium y

Staphylococcus aureus, seguidos por las concentraciones de 1% y 0.5%; además, dichos extractos no alteraron negativamente la aceptabilidad general ni las características sensoriales de la carne molida, lo que evidencia su potencial como aditivos naturales, seguros y de bajo costo para controlar microorganismos patógenos y prolongar la vida útil de productos cárnicos (Abdallah *et al.*, 2023).

En el experimento de Ali *et al.* (2025) los extractos metanólicos de *Moringa oleifera* y *Thymus vulgaris* mostraron actividad antibacteriana y efectos benéficos sobre el crecimiento y la salud intestinal de pollos desafiados con *Escherichia coli*; además, algunas combinaciones presentaron resultados comparables a los antibióticos convencionales, por lo que estos extractos podrían considerarse alternativas naturales en producción avícola, aunque aún se requieren estudios que validen su eficacia y viabilidad comercial.

Ambas especies de *Moringa* exhibieron una notable capacidad antibacteriana frente a cepas Gram-negativas de relevancia clínica, destacando que *M. peregrina* superó en ocasiones la eficacia de antibióticos convencionales, dado que, éste efecto bactericida se atribuye probablemente a la presencia de esteroides en su perfil fitoquímico, los cuales actúan directamente sobre las membranas celulares bacterianas, posicionando a la *Moringa* como una alternativa fitoterapéutica viable frente a la creciente problemática de resistencia en bacterias Gram-negativas (Wizrah *et al.*, 2025).

Los resultados de van den Berg y Kuipers (2022) mostraron variaciones en la susceptibilidad bacteriana y en las concentraciones de los extractos de hojas y semillas de *Moringa oleifera* evaluados, ya que la mayoría de las bacterias

presentaron una susceptibilidad ausente o de baja a moderada frente a los extractos; sin embargo, el extracto metanólico de hojas mostró mayor actividad frente a *Pseudomonas spp.*, mientras que *E. coli*, *Klebsiella pneumoniae* y *Staphylococcus aureus* exhibieron susceptibilidad variable o baja sensibilidad; además, los extractos completos de semillas presentaron la mayor actividad antibacteriana entre los tratamientos evaluados.

En el estudio de Wankhade et al. (2025) el extracto acetónico de hojas de *Moringa oleifera* presentó actividad antimicrobiana frente a *Escherichia coli*, *Enterobacter cloacae*, *Proteus vulgaris*, *Staphylococcus aureus* y *Moraxella kristinae* a una concentración de 5 mg/mL, además, *M. kristinae* mostró susceptibilidad desde 0.5 mg/mL y un efecto bactericida a 1.0 mg/mL, mientras que en *S. aureus*, *E. cloacae* y *P. vulgaris* se observó principalmente actividad bacteriostática, evidenciando que la eficacia del extracto depende de la concentración utilizada y de la bacteria evaluada.

Además de constituir una fuente importante de compuestos bioactivos, *Moringa oleifera* ha despertado gran interés en la investigación nutricional debido a sus bajos requerimientos de cultivo, lo que favorece su amplia distribución en diferentes regiones del mundo, dado que, diversos estudios *in vitro* e *in vivo* han evaluado su potencial farmacológico, seguridad y toxicidad, demostrando múltiples actividades biológicas con efectos tóxicos mínimos; sin embargo, pese a sus propiedades terapéuticas prometedoras, su aplicación medicinal aún es limitada y requiere mayor respaldo mediante estudios clínicos que permitan fortalecer su uso y difusión en el ámbito biomédico (Azlan et al., 2022).

2.9. Mecanismos de acción de los compuestos bioactivos de *M. oleifera*

Los compuestos fenólicos presentes en *M. oleifera* ejercen actividad antimicrobiana mediante múltiples mecanismos de acción, reduciendo la probabilidad de desarrollo de resistencia bacteriana y convirtiéndolos en candidatos atractivos para el desarrollo de nuevos agentes antimicrobianos (Bouyahya *et al.*, 2022). Entre los principales mecanismos descritos se encuentran la alteración de la integridad de la membrana celular, el aumento de la permeabilidad y la fuga de componentes intracelulares, lo que conduce a pérdida de funcionalidad celular y eventual muerte bacteriana (Zhang *et al.*, 2021).

Diversos extractos de hojas de *Moringa oleifera*, especialmente los obtenidos con etanol e hidroetanol, han mostrado actividad antimicrobiana frente a *E. coli*, debido a que sus compuestos interfieren en procesos biológicos esenciales de la bacteria, como la respuesta al estrés, el metabolismo, la síntesis de proteínas y ribosomas, la producción de ATP, la síntesis de membrana y la unión al ADN, alterando el funcionamiento celular e inhibiendo el crecimiento bacteriano, lo que evidencia el potencial de *Moringa oleifera* como agente antimicrobiano natural para el control de infecciones causadas por *E. coli* (Smith *et al.*, 2020).

El extracto de hojas de *Moringa* con etanol y etilacetato cuentan con perfiles químicos únicos lo que los convierte en opciones como un potente tratamiento natural debido a sus características como antioxidantes y sus cualidades inhibitorias de α -glucosidasa, debido a sus altos niveles de ácido palmítico y ácido α -linoleico, los cuales le confieren su potencial como medicamentos, esto confirmándose bajo pruebas DPPH y ABTS que demuestran su capacidad gracias a una eficiente

neutralización de radicales libres y su confirmación como alternativa para el tratamiento de diabetes al posponer la absorción de carbohidratos y reduciendo la hiperglicemia postprandial (Al Shamari *et al.*, 2025).

La quercetina es un compuesto presente en las hojas de *Moringa oleifera* y otras plantas, el cual le brinda su capacidad antibiótica al acoplarse de manera efectiva a proteínas específicas, lo cual provoca una interrupción en sus procesos por enlaces de hidrogeno, interacciones hidrofóbicas y fuerzas de van der Waals, y consecuentemente contribuye a sus efectos antibacterianos, ya que estas reacciones inhiben vías relacionadas con algunas enfermedades que provocan estrés oxidativo y actividad enzimática (Slimen *et al.*, 2024).

Estos biocomponentes aportan de manera significativa a su potencial antimicrobiano, antioxidante, antiinflamatorio y potencia terapéutica, los cuales pueden variar en presencia y concentraciones dependiendo de la parte de la planta analizada, su potencial antibiotico ocurre a través de diferentes mecanismos tales como alteración de las paredes celulares, inhibir la acción enzimática de proteínas y la interrupción en la replicación del ADN, por lo cual, esta variedad de efectos la convierten en una excelente opción para el desarrollo de nuevas terapias, adicionalmente, su capacidad para interrumpir factores clave de virulencia, motilidad y producción de pigmentos, dando como resultado la alteración para evitar creación de biopelículas por bacterias patogénicas (Varinder *et al.*, 2025).

De manera complementaria, diversos estudios han demostrado que los extractos foliares de *Moringa oleifera* pueden inhibir microorganismos patógenos al interferir con procesos regulados por quorum sensing (QS), como la síntesis de pigmentos

asociados con virulencia, la movilidad bacteriana y la formación de biopelículas, por lo que estas acciones disminuyen la capacidad de colonización e infección bacteriana; además, la combinación de estos extractos con antimicrobianos convencionales podría fortalecer estrategias terapéuticas frente a bacterias resistentes, aunque aún se requiere profundizar en los mecanismos moleculares implicados (Suhartono *et al.*, 2019).

Los fitoquímicos de *Moringa oleífera* tienen una amplia aplicación al tener múltiples actividades biológicas, como reducir el estrés oxidativo en células nerviosas y efectos antidepresivos, ansiolíticos y antiepilépticos, además de reducir la toxicidad de metales pesados, reducción de citoquinas y proteínas relacionadas a la inflamación, función hepatoprotectora y mostrando efectos antibióticos al alterar en funcionamiento normal de las células bacterianas y aumentando el nivel de enzimas antioxidantes (Tao *et al.*, 2025).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ubicación y condiciones del estudio

El trabajo de laboratorio se llevó a cabo en las instalaciones del Laboratorio de Química del Departamento de Ciencias Básicas de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Unidad Laguna, ubicado en las coordenadas 25.556783 N y -103.375214 O, a una altitud de 1120 m. Los procedimientos se realizaron bajo condiciones controladas de temperatura (25 °C) y protección de la luz en aquellas etapas susceptibles a degradación fotoquímica. El material vegetal consistió en hojas frescas de *Moringa oleifera*, colectadas de ejemplares representativos de la especie e identificadas botánicamente previo a su procesamiento.

3.2. Diseño experimental

El estudio se desarrolló bajo un diseño completamente al azar, en el que se evaluó el efecto de dos factores: el tipo de solvente de extracción y la concentración del extracto sobre la actividad antibacteriana.

Los tratamientos estuvieron conformados por la combinación de:

- Tres solventes de extracción: agua destilada, etanol al 70 % y etanol al 96 %.
- Diferentes concentraciones del extracto aplicadas (35 µL, 50 µL y 100 µL).

Cada tratamiento contó con tres repeticiones.

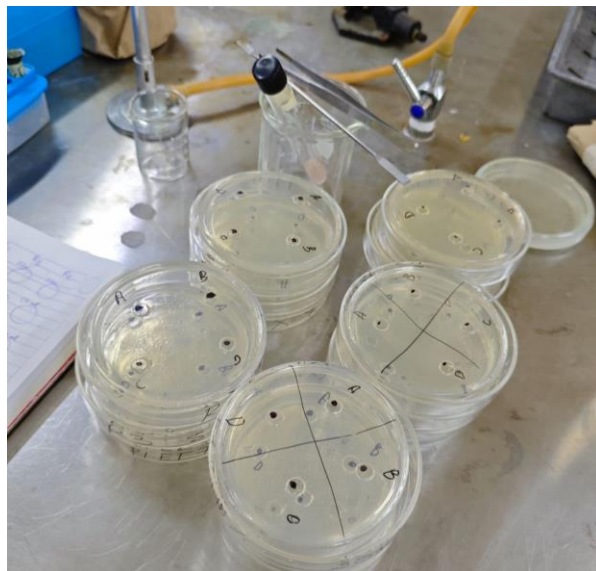


Figura 6. Cultivos de *E. coli* para aplicación de extracto de *Moringa oleífera*.

3.3. Obtención y preparación de extractos

3.3.1. Preparación y secado del material vegetal

Las hojas colectadas se lavaron con agua destilada y se secaron con toallas de papel. Posteriormente, el material se cortó en tiras finas para optimizar el proceso de secado y la molienda posterior. Se pesaron entre 200 y 300 g de peso fresco (PF), distribuidos en bandejas etiquetadas (Y1, Y2 y Y3) con una carga de 30 a 50 g por unidad. De manera paralela, se pesaron 10.00 g de muestra fresca en un crisol independiente (HUM) para determinar el porcentaje de humedad.

El secado se realizó en una estufa a 55 °C durante 90 min, seguido de una aireación mediante remoción del material con espátula para liberar el vapor acumulado. Posteriormente, las muestras se reintrodujeron a la estufa durante 30 min adicionales. Las muestras se enfriaron bajo condiciones cubiertas durante 10 min antes de cada pesaje. El ciclo de secado y pesaje se repitió hasta alcanzar masa

constante, definida como una diferencia menor al 1 % entre pesadas consecutivas. El material seco se selló con papel aluminio y se conservó en cuarto frío hasta su utilización.

3.3.2. Extracción por maceración

El material seco se maceró en mortero hasta obtener un polvo fino. Se pesaron 2 g de polvo por tratamiento por triplicado, utilizando duplicados (4 g por réplica en total), en tubos Falcon de 50 mL. A cada tubo se añadieron 20 mL del solvente correspondiente: agua destilada (AQ, seis tubos), etanol al 96 % (ET, seis tubos) o etanol al 70 % (HA70, seis tubos).

La extracción se realizó bajo agitación constante de 100 a 150 rpm durante 24 h a 25 °C, manteniendo los tubos protegidos con papel aluminio para evitar la degradación fotoquímica.

Una vez concluida la extracción, se combinaron los volúmenes de los duplicados correspondientes a cada réplica. Se efectuó una primera evaporación en baño María a 70 °C utilizando tapas perforadas para permitir la salida de vapor, seguida de una filtración con papel Whatman No. 1. El filtrado obtenido se llevó a masa constante en baño María a 50 °C utilizando cápsulas de porcelana previamente taradas. Finalmente, el extracto seco resultante (m_{ext}) se transfirió a tubos con tapa de rosca, envueltos en papel aluminio y almacenados a 4 °C hasta su análisis.

3.4. Variables evaluadas

3.4.1. Preparación de soluciones stock

A partir de cada extracto seco se preparó una solución madre de 10 mg/mL mediante la disolución de 100 mg de extracto en 10.00 mL del solvente correspondiente, utilizando agitación o sonificación para asegurar la completa solubilización. En aquellos casos donde se observaron concentraciones elevadas (HA70R2 o AQR3), se realizaron pre-diluciones de 1:5 o 1:10 antes de la preparación de las soluciones de trabajo para garantizar la exactitud del pipeteo.

3.4.2. Evaluación de la capacidad antioxidante (método DPPH)

Se preparó una solución de DPPH a 0.30 mM en etanol al 96 %, ajustando la absorbancia del control entre 0.9 y 1.1 a 517 nm. A partir de una solución intermedia de 1 mg/mL se prepararon diluciones de los extractos a concentraciones de 25, 50 y 100 µL para la construcción de la curva de trabajo.

Las lecturas se realizaron siguiendo el siguiente procedimiento: el espectrofotómetro se calibró utilizando etanol al 96 % como blanco; para la muestra activa se mezcló 1.00 mL de solución DPPH con 1.00 mL de cada dilución del extracto y se incubó durante 30 min en oscuridad. Para el blanco de muestra se mezcló 1.00 mL de etanol al 96 % con 1.00 mL del extracto, sin adición de DPPH, con el fin de corregir la absorbancia generada por el color propio del extracto.

El porcentaje de inhibición se calculó mediante la ecuación:

$$\% \text{ Inhibición} = [A_{\text{control}} - (A_{\text{muestra}} - A_{\text{blanco muestra}})] / A_{\text{control}} \times 100$$

A partir de estos resultados se determinó la concentración inhibitoria media (IC_{50}) para cada extracto.

3.4.3. Diámetro de halo de inhibición

La actividad antibacteriana se evaluó mediante la técnica de difusión en agar por pozos. Se preparó una suspensión bacteriana a partir de colonias de *Escherichia coli*, la cual se inoculó uniformemente sobre la superficie de placas con agar nutritivo utilizando un hisopo estéril.

Posteriormente, se realizaron pozos en el agar y se depositaron los diferentes extractos en los volúmenes correspondientes a cada tratamiento. Las placas se incubaron a una temperatura de 35–37 °C durante un periodo de 18 a 24 h.

Al finalizar la incubación, se midió el diámetro del halo de inhibición alrededor de cada pozo utilizando una regla milimétrica o vernier, expresando los resultados en milímetros.

3.4. Análisis estadístico

Los datos obtenidos se sometieron a un análisis de varianza (ANOVA) para determinar la existencia de diferencias significativas entre tratamientos.

Cuando se detectaron diferencias estadísticas significativas, se aplicó la prueba de comparación múltiple de medias de Tukey con un nivel de significancia de $p \leq 0.05$.

Todos los análisis estadísticos se realizaron utilizando el software RStudio versión 4.6.0.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Contenido de fenoles totales

El extracto etanólico al 96 % (ET96%) presentó el mayor contenido de fenoles totales (102.96 mg GAE g⁻¹), seguido del extracto hidroalcohólico al 70 % (HA70%, 83.75 mg GAE g⁻¹). Sin embargo, el análisis estadístico no detectó diferencias significativas entre ambos solventes (Tukey, $p = 0.29$),

Cuadro 1 . Contenido de fenoles totales en extractos foliares de *Moringa oleifera*.

Extracto	mg GAE g ⁻¹ extracto
ET 96 %	102.96 ± 23.84 ^a
HA 70 %	83.75 ± 12.99 ^a

Esta ausencia de significancia se atribuye a la elevada variabilidad entre repeticiones del extracto ET96% (DE = 23.84), que refleja una extracción no uniforme entre tandas más que un error de medición, dado que los coeficientes de variación dentro de cada triplicado fueron bajos (3.5–11.5 %). No obstante, la tendencia numérica indica que el etanol al 96 % recuperó mayor cantidad de compuestos fenólicos, lo que concuerda con la naturaleza química de los fenoles predominantes en *M. oleifera*, entre los que destacan el ácido clorogénico, la quercetina y los glucosinolatos, compuestos con mayor afinidad por solventes de polaridad media-baja como el etanol concentrado (Vongsak *et al.*, 2013; Liga *et al.*, 2025). Resultados similares han sido reportados en extractos etanólicos de moringa, donde el etanol al 95–96 % supera consistentemente a los extractos acuosos e hidroalcohólicos en contenido fenólico total (Herman-Lara *et al.*, 2024; Teixeira *et al.*, 2014). Se recomienda incrementar el número de repeticiones en

estudios posteriores para confirmar con mayor potencia estadística la tendencia observada.

4.2 Contenido de flavonoides totales

El extracto etanólico al 96 % presentó el mayor contenido de flavonoides totales (52.35 mg QE g⁻¹), más del doble que el extracto hidroalcohólico (21.53 mg QE g⁻¹). A pesar de esta diferencia numérica, el análisis estadístico no detectó significancia entre solventes (Tukey, $p = 0.19$), resultado atribuible a la alta variabilidad entre repeticiones de ambos extractos, particularmente evidente en los triplicados de absorbancia, cuyos coeficientes de variación alcanzaron hasta 52 % en algunas repeticiones de HA70% (Cuadro 2).

La tendencia observada, con mayor contenido de flavonoides en el extracto etanólico, es consistente con la afinidad de los flavonoides de *M. oleifera* por solventes orgánicos de mayor concentración. Los principales flavonoides reportados en moringa incluyen quercetina, kaempferol e isorhamnetina, compuestos que se solubilizan más eficientemente en etanol concentrado que en mezclas hidroalcohólicas (Vongsak *et al.*, 2013; Leone *et al.*, 2015).

Cuadro 2. Contenido de flavonoides totales en extractos foliares de *Moringa oleifera*.

Extracto	mg QE g ⁻¹ extracto
ET 96 %	52.35 ± 30.43 ^a
HA 70 %	21.53 ± 14.00 ^a

Medias ± desviación estándar (n = 3). Medias con la misma literal no difieren significativamente (Tukey, $p \leq 0.05$).

La actividad antioxidante de los extractos de *Moringa oleifera*, evaluada mediante el método de captación del radical DPPH, mostró un comportamiento dependiente de

la concentración en ambos solventes (Cuadro 3). A las concentraciones más bajas (25 y 50 µg/mL) los valores de inhibición fueron negativos o cercanos a cero. Este resultado no implica que los extractos carezcan de actividad antioxidante, sino que la concentración es insuficiente para producir una diferencia detectable respecto al control bajo las condiciones del ensayo.

Cuadro 3. Porcentaje de inhibición del radical DPPH por extracto y concentración.

Extracto	25 µg/mL	50 µg/mL	100 µg/mL	150 µg/mL	200 µg/mL
ET 96 %	-2.0 ^a	3.9 ^a	25.1 ^a	31.3 ^a	35.0 ^a
HA 70 %	-23.1 ^a	-0.4 ^a	15.8 ^a	43.6 ^a	57.3 ^a

Las literales comparan los solventes dentro de cada concentración (Tukey, $p \leq 0.05$).

Valores negativos indican ausencia de captación del radical a esa concentración.

A partir de 100 µg/mL la inhibición fue positiva y mostró una tendencia creciente en ambos extractos, siendo el extracto hidroalcohólico (HA70%) el que alcanzó el mayor porcentaje de inhibición a 200 µg/mL (57.3 %), superando numéricamente al etanólico (35.0 %).

No obstante, el análisis estadístico no detectó diferencias significativas entre solventes en ninguna de las concentraciones evaluadas (Tukey, $p > 0.05$ en todos los casos), resultado que se explica por la alta variabilidad.

En términos comparativos, la actividad antioxidante de los extractos de *M. oleifera* evaluada en este estudio fue moderada. Estudios previos han reportado capacidades antioxidantes considerablemente mayores en extractos de moringa, con porcentajes de inhibición superiores al 70–80 % a concentraciones equivalentes, atribuibles a su riqueza en compuestos fenólicos como el ácido clorogénico y flavonoides como la quercetina y el kaempferol (Vongsak *et al.*, 2013; Herman-Lara *et al.*, 2024).

4.3 Actividad antimicrobiana frente a *Escherichia coli*

Ambos extractos de *Moringa oleifera* produjeron halos de inhibición frente a *Escherichia coli* ATCC 25922 en los tres volúmenes evaluados. El análisis de varianza no detectó efecto significativo del solvente ($F = 0.01$; $p = 0.91$), el volumen aplicado ($F = 1.87$; $p = 0.19$) ni su interacción ($F = 0.38$; $p = 0.69$). Sin embargo, al comparar cada extracto con su propio control de solvente mediante una prueba *t* pareada, se observó que el extracto ET96% a 50 μL ($p = 0.041$) y el extracto ET70% a 100 μL ($p = 0.047$) produjeron halos significativamente mayores que su respectivo control de solvente, lo que confirma que a esos volúmenes el efecto inhibitorio es atribuible a los compuestos del extracto y no al solvente por sí solo. Los demás tratamientos no alcanzaron significancia frente a sus controles ($p = 0.07$ – 0.22), aunque mostraron la misma tendencia (Cuadro 4).

Cuadro 4. Diámetro del halo de inhibición (mm) de los extractos foliares de *Moringa oleifera* frente a *Escherichia coli* ATCC 25922.

Extracto	35 μL	50 μL	100 μL
ET 70 %	9.95 $\pm$ 1.37 ^a	10.97 $\pm$ 1.95 ^a	11.20 $\pm$ 1.09 ^a
ET 96 %	9.74 $\pm$ 0.72 ^a	10.28 $\pm$ 0.42 ^a	12.12 $\pm$ 3.65 ^a
Control ET 70 %	8.84 $\pm$ 0.98	9.12 $\pm$ 0.70	8.40 $\pm$ 0.00
Control ET 96 %	9.09 $\pm$ 0.24	9.58 $\pm$ 0.56	8.40 $\pm$ 0.00

Medias $\pm$ desviación estándar. $n = 4$ para 35 y 50 μL ; $n = 3$ para 100 μL . Medias con la misma literal no difieren significativamente entre tratamientos (Tukey, $p \leq 0.05$). El diámetro del pozo es de 8.4 mm.

En términos generales, los halos observados aumentaron con el volumen aplicado en ambos extractos, siendo el ET96% a 100 μL el que registró numéricamente el mayor diámetro (12.12 mm), aunque con la mayor variabilidad entre repeticiones

(DE = 3.65 mm). Esta variabilidad se explica principalmente por la repetición R1, que produjo un halo de 16.3 mm notablemente superior a R2 (9.55 mm) y R3 (10.50 mm); dado que las dos medidas del duplicado de R1 fueron consistentes entre sí (16.1 y 16.5 mm), este valor no constituye un error de lectura sino una variación biológica real, posiblemente relacionada con diferencias en la homogeneidad del inóculo entre placas.

La actividad antibacteriana observada en ambos extractos de *M. oleífera* frente a *E. coli* es consistente con lo reportado en la literatura. Diversos estudios han documentado la capacidad inhibitoria de extractos etanólicos e hidroalcohólicos de moringa frente a bacterias Gram negativas, atribuida principalmente a la presencia de isotiocianatos, glucosinolatos, quercetina y kaempferol, compuestos capaces de alterar la integridad de la membrana celular bacteriana e interferir en la síntesis de proteínas esenciales (Vongsak *et al.*, 2013; Herman-Lara *et al.*, 2024). La menor diferencia entre extractos y controles a los volúmenes más bajos (35 µL) podría deberse a que la cantidad de compuestos bioactivos depositada en el pozo es insuficiente para superar la concentración mínima inhibitoria frente a una bacteria Gram negativa como *E. coli*, cuya membrana externa actúa como barrera adicional que limita la difusión de muchos antimicrobianos de origen vegetal (De Fazio *et al.*, 2024; Braz *et al.*, 2020). El hecho de que a 100 µL el control de solvente no produjera halo alguno (8.40 mm = diámetro del pozo) mientras que ambos extractos sí lo hicieron, refuerza la interpretación de que el efecto inhibitorio a ese volumen es genuino y atribuible a los metabolitos secundarios de *M. oleífera*.

La coincidencia entre el mayor contenido numérico de fenoles y flavonoides en el extracto ET96% y su actividad antibacteriana confirma a los compuestos fenólicos como los principales responsables de las propiedades biológicas observadas en *Moringa oleifera*. Aunque las diferencias entre solventes no alcanzaron significancia estadística en ninguna de las variables evaluadas, la tendencia consistente del extracto etanólico al 96 % como el de mayor contenido de metabolitos bioactivos y actividad inhibitoria sugiere que este solvente es el más eficiente para la recuperación de compuestos con potencial antimicrobiano en esta especie.

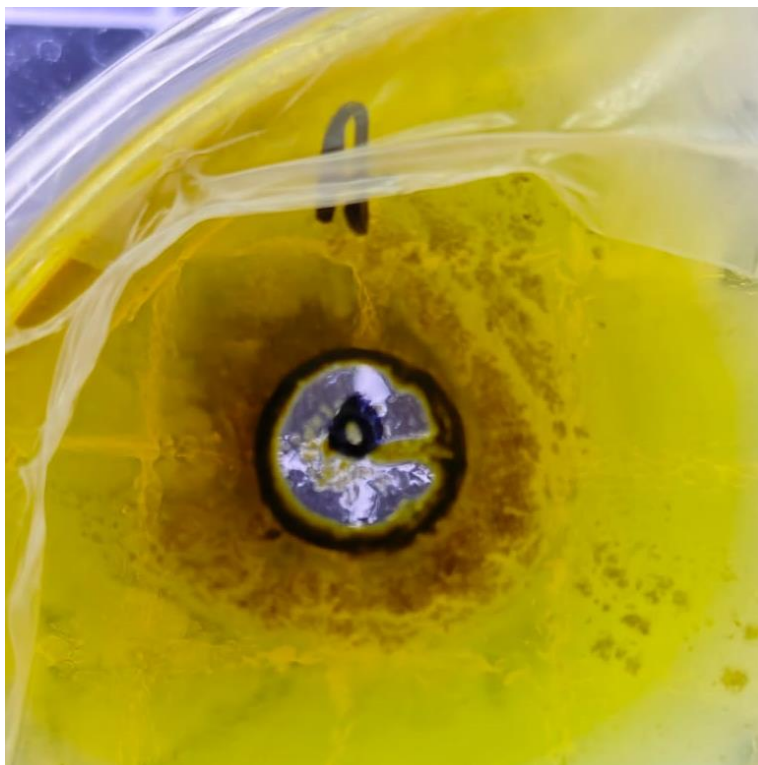


Figura 7. Halo de inhibición en cultivo de *E. coli* por extracto etanólico al 96% de *Moringa oleifera*.

Con base en diferentes estudios consultados con enfoques diversos por las partes de la planta podemos encontrar diferentes biocompuestos y concentraciones

distintas de ellos, sería adecuado probar en una mayor cantidad de repeticiones para seguir identificando métodos de extracción más eficientes y resultados más uniformes, trabajar con una mejor cuantificación específica de los compuestos para un manejo adecuado de dosis y evitar niveles de posible toxicidad a los posibles organismos, además de la prueba de diferentes opciones vehículo para su ingestión o aplicación y asegurar la efectividad de sus beneficios al implementarlo en diversas áreas como: producción, manejo preventivo, tratamiento cada vez menor a los antibióticos o en sinergia con estos para evitar la generación de resistencia, así como conservación de alimentos.

5. CONCLUSIONES

En conclusión, los extractos foliares de *Moringa oleifera* demostraron poseer compuestos bioactivos con capacidad antioxidante y actividad antimicrobiana frente a *Escherichia coli*, evidenciando su potencial como fuente natural de moléculas de interés para aplicaciones en medicina veterinaria, salud pública e industria alimentaria. Aunque las diferencias entre los solventes evaluados no fueron estadísticamente significativas, el extracto etanólico al 96 % mostró una tendencia a recuperar mayores cantidades de fenoles y flavonoides, mientras que el extracto hidroalcohólico presentó una mayor capacidad de neutralización de radicales libres a concentraciones elevadas. Asimismo, ambos extractos inhibieron el crecimiento bacteriano, confirmando la presencia de metabolitos con efecto antimicrobiano. De manera conjunta, estos resultados respaldan el potencial de *Moringa oleifera* como una alternativa natural prometedora para contribuir al desarrollo de estrategias complementarias destinadas al control del estrés oxidativo y de microorganismos patógenos, particularmente en el contexto actual de la creciente resistencia a los antibióticos.

6. REFERENCIAS

- Alhadlaq, M. A, Aljurayyad, O. I., Almansour, A., Al-Akeel, S. I., Alzahrani, K. O., Als Salman, S. A., Yahya, R., Al-Hindi, R. R., Hakami, M. A., Alshahrani, S. D., Alhumeed, N. A., Al-Moneea, A. M., Al-Seghayer, M. S., AlHarbi, A. L., Al-Reshoodi, F. M., Alajel, S. (2023). Overview of pathogenic *Escherichia coli*, with a focus on Shiga toxin-producing serotypes, global outbreaks (1982-2024) and food safety criteria. *Gut Pathog.*;16(1):57
- Abdallah, R., Mostafa, N. Y., Kirrella, G. A. K., Gaballah, I., Imre, K., Morar, A., Herman, V., Sallam, K. I., & Elshebrawy, H. A. (2023). Antimicrobial effect of *Moringa oleifera* leaves extract on foodborne pathogens in ground beef. *Foods*, 12(4), 766
- Al Shammari, Latifah & Al-Mustafa, Ahmed & Alfarrayeh, Ibrahim & al Saharin, Raed & Al-Rimawi, Fuad & Al-Hroub, Hamza & Semreen, Mohammad & Mousa, Muath & Salman, Haya & Al-Mazaideh, Ghassab & Shalayel, Mohammed. (2025). The Remarkable Benefits of *Moringa oleifera*: Antioxidant Strength and α -Glucosidase Inhibition. *Natural Product Communications*. 20. 10.1177/1934578X251349933
- Ali, M., Chand, N., Khan, S., Khan, R. U., Maqbool, B., Naz, S., Abudabos, A., Hafeez, A., & Alhidary, I. A. (2025). In vitro screening of antibacterial efficacy of *Moringa oleifera* and *Thymus vulgaris* methanolic extracts against different *Escherichia coli* strains and their in vivo effects against *E. coli*-induced infection in broiler chickens. *Veterinary Sciences*, 12(10), 957

- Allam, S. A., Elnomrosy, S. M., & Mohamed, S. M. (2024). Virulent multidrug-resistant ESBL *Escherichia coli* and *Klebsiella pneumoniae* in calves diarrhea and in vitro antimicrobial activity of *Moringa oleifera*. *BMC Veterinary Research*, 20(1), 1-12
- Amee, K. N. S., Islam, Z., Sumi, F. J., Mondol, M. I., Soma, M. A., Harun-Or-Rashid, M., Shahid, M. I., Kawsar, M. H., Hossain, M. J., Hasan, R., & Sarker, M. M. R. (2023). Phytochemical profiling and evaluation for anti-oxidant, thrombolytic, and antimicrobial activities of *Moringa oleifera* Lam leaves extracts. *Biomedical & Pharmacology Journal*, 16(2), 1027–1036
- Apenteng-Takyiako, S., Takyi, C. A. A., Chama, M., Osei, M. M., Donkor, E. S., & Futagbi, G. (2025). In vitro antibacterial activity of *Moringa oleifera* leaf and seed extracts against antibiotic-resistant bacteria and clinical isolates. *BMC Complementary Medicine and Therapies*, 25(1), Article 45
- Arip, M., Selvaraja, M., Tan, L. F., Leong, M. Y., Tan, P. L., Yap, V., Chinnapan, S., Tat, N. C., Abdullah, M., & Jubair, N. (2022). Plant-based strategies in combating antimicrobial resistance: A mechanistic review. *Frontiers in Pharmacology*, 13, 847162
- Azlan, U. K., Mediani, A., Rohani, E. R., Tong, X., Han, R., Misnan, N. M., Jam, F. A., Bunawan, H., Sarian, M. N., & Hamezah, H. S. (2022). A comprehensive review with updated future perspectives on the ethnomedicinal and pharmacological aspects of *Moringa oleifera*. *Molecules*, 27(18), 5765

- Bhandari, S., Khadayat, K., Poudel, S., Shrestha, S., Shrestha, R., Devkota, P., Khanal, S., & Marasini, B. (2021). Phytochemical analysis and antibacterial and antibiofilm activities of medicinal plants against uropathogenic *Escherichia coli*. *BMC Complementary Medicine and Therapies*, 21(1), 1-14
- Bonincontro, G., Scuderi, S. A., Marino, A., & Simonetti, G. (2023). Synergistic effect of plant compounds in combination with conventional antimicrobials against biofilm of *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas aeruginosa*, and *Candida* spp. *Pharmaceuticals*, 16(11), Artículo 1531
- Bouyahya, A., Chamkhi, I., Balahbib, A., Rebezov, M., Shariati, M., Wilairatana, P., Mubarak, M. S., Benali, T., & El Omari, N. (2022). Mechanisms, anti-quorum-sensing actions, and clinical trials of medicinal plant bioactive compounds against bacteria: A comprehensive review. *Molecules*, 27(1), 148
- Davidova, S., Galabov, A. S., & Satchanska, G. (2024). Antibacterial, antifungal, antiviral activity, and mechanisms of action of plant polyphenols. *Microorganisms*, 12(2), 356
- Elshobary, M. E., Badawy, N. K., Ashraf, Y., Zatioun, A. A., Masriya, H. H., Ammar, M. M., Mohamed, N. A., Mourad, S., & Assy, A. M. (2025). Combating Antibiotic Resistance: Mechanisms, Multidrug-Resistant Pathogens, and Novel Therapeutic Approaches: An Updated Review. *Pharmaceuticals*, 18(3), 402
- El-Sakhawy, M. A., El Raheim Mohammed Donia, A., Juraybi, T. N., El-Sherbiny Ateya, A. A., Osman, W., Abd-Elghany, A. A., Soliman, M. M., Kobisi, A. N.

- A., & Balah, M. A. (2026). Action mechanism of essential oils or their components against pathogenic bacteria: Literature review. *International Journal of Microbiology*, 2026, Artículo 7468450
- El-Sherbiny, G. M., Alluqmani, J. A., Elsehemy, I. A., & Kalaba, M. H. (2024). Antibacterial, antioxidant, cytotoxicity, and phytochemical screening of *Moringa oleifera* leaves. *Scientific Reports*, 14(1), Artículo 30485
- Herman-Lara, E., Rodríguez-Miranda, J., Ávila-Manrique, S., Dorado-López, C., Villalva, M., Jaime, L., Santoyo, S., y Martínez-Sánchez, C. E. (2024). In vitro antioxidant, anti-inflammatory activity and bioaccessibility of ethanolic extracts from Mexican *Moringa oleifera* leaf. *Foods*, 13(17), 2709
- Herrero, M., Hugas, M., Lele, U., Wirakartakusumah, A., Torero, M. (2023). Un cambio hacia patrones de consumo saludables y sostenibles. En: von Braun, J., Afsana, K., Fresco, LO, Hassan, MHA (eds.) *Ciencia e innovaciones para la transformación de los sistemas alimentarios*. Springer, Cham
- Idris, A., & Abubakar, U. (2016). Phytochemical and antibacterial investigations of moringa (*Moringa oleifera*) leaf extract on selected bacterial pathogens. *Journal of Microbiology and Antimicrobials*, 8(5), 28–33
- Kashyap, P., Kumar, S., Riar, C. S., Jindal, N., Baniwal, P., Guiné, R. P. F., Correia, P. M. R., Mehra, R., & Kumar, H. (2022). Recent advances in *Moringa oleifera* leaves bioactive compounds: Composition, health benefits, bioaccessibility, and dietary applications. *Antioxidants*, 11(6), 1153

- Klimek-Szczykutowicz, M., Gawel-Beben, K., Rutka, A., Blicharska, E., Tatarczak-Michalewska, M., Kulik-Siarek, K., Kukuła-Koch, W., Malinowska, M., & Szopa, A. (2024). *Moringa oleifera* (drumstick tree)—Nutraceutical, cosmetological and medicinal importance: A review. *Frontiers in Pharmacology*, 15, 1354793
- Leone, A., Spada, A., Battezzati, A., Schiraldi, A., Aristil, J., y Bertoli, S. (2015). Cultivation, genetic, ethnopharmacology, phytochemistry and pharmacology of *Moringa oleifera* leaves: An overview. *International Journal of Molecular Sciences*, 16(6), 12791–12835
- Liga, S., Magyari-Pavel, I. Z., Avram, Ș., Minda, D., Vlase, A. M., Muntean, D., Vlase, L., Moacă, E. A., & Danciu, C. (2025). Comparative analysis of *Moringa oleifera* leaves ethanolic extracts: Effects of extraction methods on phytochemicals, antioxidant, antimicrobial, and biological profile. *Plants*, 14(2), 210
- Liga, S., Magyari-Pavel, I. Z., Avram, Ș., Minda, D. I., Vlase, A.-M., Muntean, D., Vlase, L., Moacă, E.-A., y Danciu, C. (2025). Comparative analysis of *Moringa oleifera* Lam. leaves ethanolic extracts: Effects of extraction methods on phytochemicals, antioxidant, antimicrobial, and biological profile. *Plants*, 14(11), 1653
- Mba, I. E., & Nweze, E. I. (2022). Antimicrobial peptides therapy: An emerging alternative for treating drug-resistant bacteria. *Yale Journal of Biology and Medicine*, 95(4), 445–463

- Miranda García, M. C. (2013). *Escherichia coli* portador de betalactamasas de espectro extendido. *Resistencia. Sanidad Militar*, 69(4), 244–248. ISSN 1887-8571
- Mudau KL, Ntobeng LR, Kalu CM and Tekere M (2025) Pathogenicity and virulence factors of *Escherichia coli* discovered using next generation sequencing technologies and proteomics. *Front. Bacteriol.* 4:1677775
- Naidoo, N., y Zishiri, O. T. (2025). Presence, pathogenicity, antibiotic resistance, and virulence factors of *Escherichia coli*: A review. *Bacteria*, 4(1), 16
- Nasrollahian S, Graham JP and Halaji M (2024) A review of the mechanisms that confer antibiotic resistance in pathotypes of *E. coli*. *Front. Cell. Infect. Microbiol.* 14:1387497
- Nazzaro, F., Fratianni, F., Coppola, R., & Feo, V. D. (2017). The potential of plant phenolics in antimicrobial activity: Mechanisms and applications. *Frontiers in Microbiology*, 8, 201
- Nobossé, P., Fogue, P. S., & Ngai, T. G. (2018). Effects of age and extraction solvent on phytochemical content and antioxidant activity of fresh *Moringa oleifera* L. leaves. *Food Science & Nutrition*, 6(8), 2188–2198
- Olson, M. E., & Fahey, J. W. (2011). *Moringa oleifera*: un árbol multiusos para las zonas tropicales secas. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 82(4), 1071–1082

- Papaneophytou, C. (2026). Phytochemical quorum-sensing inhibitors against bacterial pathogens: Mechanisms of action and translational challenges. *Current Issues in Molecular Biology*, 48(2), Artículo 214
- Pareek, A., Pant, M., Gupta, M. M., Kashania, P., Ratan, Y., Jain, V., Pareek, A., & Chuturgoon, A. A. (2023). *Moringa oleifera*: An updated comprehensive review of its pharmacological activities, ethnomedicinal, phytopharmaceutical formulation, clinical, phytochemical, and toxicological aspects. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(3), Artículo 2098
- Peñaloza Piña, L. M., y Aspiazú Hinojosa, K. A. (2021). Mecanismos de resistencia de *Escherichia coli* en América Latina. *Revista Vive. Revista de Investigación en Salud*, 4(11), 203–216
- Pokharel, P., Dhakal, S., y Dozois, C. M. (2023). The diversity of *Escherichia coli* pathotypes and vaccination strategies against this versatile bacterial pathogen. *Microorganisms*, 11(2), 344
- Rocchetti, G., Pagnossa, J. P., Blasi, F., Cossignani, L., Piccoli, R. H., Zengin, G., Montesano, D., Cocconcelli, P., & Lucini, L. (2020). Phenolic profiling and in vitro bioactivity of *Moringa oleifera* leaves as affected by different extraction solvents. *Food Research International*, 127, 108712
- Salerno, B., Cornaggia, M., Sabatino, R., Di Cesare, A., Furlan, M., Barco, L., Orsini, M., Cordioli, B., Mantovani, C., Bano, L. & Losasso, C. (2022). Calves as Main Reservoir of Antibiotic Resistance Genes in Dairy Farms. *Front. Public Health* 10:918658

- Sandell, R. (2004). Afrontando el cambio gravitatorio de la población: ¿cambios en el orden mundial? (Análisis del Real Instituto Elcano N° 21/2004). Real Instituto Elcano de Estudios Internacionales y Estratégicos
- Saini, P., Bandsode, V., Singh, A., Mendem, S. K., Semmler, T., Alam, M., y Ahmed, N. (2024). Genomic insights into virulence, antimicrobial resistance, and adaptation acumen of *Escherichia coli* isolated from an urban environment. *mBio*, 15(1), e03545-23
- Segwatibe, M. K., Cosa, S., & Bassey, K. (2023). Antioxidant and antimicrobial evaluations of *Moringa oleifera* leaves extract and isolated compounds. *Molecules*, 28(3), 1324
- Shahrani, M., Safarpour Dehkordi, F., & Momtaz, H. (2014). Characterization of *Escherichia coli* virulence genes, pathotypes and antibiotic resistance properties in diarrheic calves in Iran. *Biological Research*, 47(1), 28
- Sharma, P., Wichaphon, J., & Klangpetch, W. (2020). Antimicrobial and antioxidant activities of *Moringa oleifera* extracts obtained by ultrasound-assisted extraction. *International Journal of Food Microbiology*, 332, 108770
- Shoaib, M., He, Z., Geng, X., Tang, M., Hao, R., Wang, S., Shang, R., Wang, X., Zhang, H., & Pu, W. (2023). The emergence of multi-drug resistant and virulence gene carrying *Escherichia coli* strains in the dairy environment: A rising threat to the environment, animal, and public health. *Frontiers in Microbiology*, 14, Artículo 1197579

- Sirwan. K., Hussein, S., Qurbani, K., Ibrahim, R. H., Fareeq, A., Mahmood, K. A., y Mohamed, M. G. (2024). Antimicrobial resistance: Impacts, challenges, and future prospects. *Journal of Medicine, Surgery, and Public Health*, 2, Artículo 100081
- Silva, A., Silva, V., Pereira, J. E., Maltez, L., Igrejas, G., Valentão, P., Falco, V., & Poeta, P. (2023). Antimicrobial resistance and clonal lineages of *Escherichia coli* from food-producing animals. *Antibiotics*, 12(6), Artículo 1061
- Smith, B. E., Order, T., Slate, J., Bauldry, S., Emrani, J., Idassi, J., Ahmed, M., Cecile, J., Bailey, C. S., Nguyen, N. A., Mowa, C. (2020). Proteomics analysis reveal that *Moringa oleifera* kills *Escherichia coli* by altering multiple biological processes. *South African Journal of Botany* 129, 366-378
- Sohaib, M., Al-Barakah, F., Migdadi, H., & Husain, F. (2021). Comparative study among plant extracts including *Moringa oleifera* for antimicrobial and antioxidant activities. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 29(1), 111-122
- Soto, J. A., Gómez, A. C., Vásquez, M., Barreto, A. N., Molina, K. S., & Zuniga-Gonzalez, C. A. (2025). Biological properties of *Moringa oleifera*: A systematic review of the last decade. *F1000Research*, 13, Artículo 1390
- Sora, V. M., Meroni, G., Martino, P. A., Soggiu, A., Bonizzi, L., & Zecconi, A. (2021). Extraintestinal pathogenic *Escherichia coli*: Virulence factors and antibiotic resistance. *Pathogens*, 10(11), 1355

- Suhartono, S., Ismail, Y. S., & Muhayya, S. R. (2019). The interference of *Moringa oleifera* leaf extracts to modulate quorum sensing-facilitated virulence factors. *Biodiversitas*, 20(10), 3000–3004
- Sun, W., & Shahrajabian, M. H. (2023). Therapeutic potential of phenolic compounds in medicinal plants—Natural health products for human health. *Molecules*, 28(4), 1845
- Tajer, L., Paillart, J.-C., Dib, H., Sabatier, J.-M., Fajloun, Z., & Abi Khattar, Z. (2024). Mecanismos moleculares de la resistencia bacteriana a los péptidos antimicrobianos en la era moderna: una revisión actualizada. *Microorganisms*, 12 (7), 1259
- Tao, L., Wang, Z., Yang, M., Kang, X., Dai, J., Zhao, C., Dai, T., Sheng, J., & Tian, Y. (2025). Phenolic compounds from *Moringa oleifera* Lam.: Extraction, separation and identification, biological activities, and comprehensive applications. *Food Science and Human Wellness*, 14, 9250052
- Van den Berg, J., & Kuipers, S. (2022). La acción antibacteriana de *Moringa oleifera*: una revisión sistemática. *South African Journal of Botany*. 224-233
- Varinder, K., Ajar, N. Y., & Puja, G. (2025). Potencial antimicrobiano de *Moringa oleifera*: fitoquímicos, mecanismos y aplicaciones en nanotecnología. *Plant Science Today*, 12(4)
- Vonghirundecha, P., Chusri, S., Meunprasertdee, P., & Kaewmanee, T. (2022). Microencapsulated functional ingredients from a *Moringa oleifera* leaf

- polyphenol-rich extract: Characterization, antioxidant properties, in vitro simulated digestion, and storage stability. *LWT*, 154, Artículo 112820
- Vongsak, B., Sithisarn, P., Mangmool, S., Thongpraditchote, S., Wongkrajang, Y., y Gritsanapan, W. (2013). Maximizing total phenolics, total flavonoids contents and antioxidant activity of *Moringa oleifera* leaf extract by the appropriate extraction method. *Industrial Crops and Products*, 44, 566–571
- Wankhade, J. D., Baitule, A. W., Malode, H. P., & Yeole, G. T. (2025). Antimicrobial activity of *Moringa oleifera* leaves: A natural approach to combat infections. *International Journal of Scientific Development and Research (IJSDR)*, 10(2)
- Wizrah MSI, Aldwsari ND and Yahia ZA (2026) Antibacterial activity of *Moringa* leaf extracts against Gram-negative bacteria from Wadi Ad-Dawasir, Saudi Arabia. *Front. Microbiol.* 16:1568105
- Zhang, S., Abbas, M., Rehman, M. U., Huang, Y., Zhou, R., Gong, S., Yang, H., Chen, S., Wang, M., & Cheng, A. (2020). Dissemination of antibiotic resistance genes (ARGs) via integrons in *Escherichia coli*: A risk to human health. *Environmental Pollution*, 266(Pt. 2), 115260
- Zhang, G., Yang, Y., Memon, F. U., Hao, K., Xu, B., Wang, S., Wang, Y., Wu, E., Chen, X., & Si, H. (2021). Antibacterial mechanism of phenolic acids against multidrug-resistant *Escherichia coli*. *Frontiers in Microbiology*, 12, 622354
- Zhao, B., Deng, J., Li, H., He, Y., Lan, T., Wu, D., Gong, H., Zhang, Y., & Chen, Z. (2019). Optimization of phenolic compound extraction from *Moringa oleifera* leaves and antioxidant activity. *Journal of Food Quality*, 2019, 1-10