

TRABAJO FIN DE MÁSTER



UCAM

UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE MURCIA

FACULTAD DE FARMACIA Y NUTRICIÓN

*Máster Universitario en Nutrición y Seguridad
Alimentaria*

ARTHROCAULON MACROSTACHYUM: CARACTERÍSTICAS NUTRICIONALES Y SU USO COMO PLANTA FITORREMEDIA DORA

Autor/a:

María Paula Jarrín Orozco

Directores:

Dr. José Ramón Acosta Motos

Dr. Gregorio Barba Espín

Murcia, Julio de 2023

Agradecimientos

Deseo agradecer en primer lugar a mis dos tutores, las personas que hicieron esto posible, el Doctor José Ramón Acosta Motos, y el Doctor Gregorio Barba Espín, que estuvieron ahí para mí en todos los momentos, guiándome y enseñándome tantas cosas nuevas. Les agradezco haber estado ahí en todos los momentos en los que ya no podía más y me quería dar por vencida, por animarme a seguir adelante.

Me gustaría agradecer a todos los profesores, que con tanta pasión y destreza nos guiaron y compartieron su conocimiento con todos nosotros. Agradezco a todos mis compañeros, por hacerme reír y también darme ánimos, por darnos ánimo entre todos para acabar con esta etapa de la forma más exitosa posible. Y, por último, pero no menos importante a mi familia, que me animó siempre a seguir adelante, me apoyaron para que persiga mis sueños de seguir con mis estudios y acompañaron cuando creía que el estrés iba a ganar.

Listado de Abreviatura

APX: ascorbato peroxidasa

AKT: proteína serina-treonina cinasa

ATP: adenosín trifosfato

CAT: catalasa

ChE: colinesterasa

DMSO: dimetilsulfóxido

DPS: declaraciones de propiedades saludables

EFSA: European Food Safety Authority - Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria

GR: glutatión reductasa

GPX: glutatión peroxidasa

GST: glutatión S-transferasa

HeLa: células de Henrietta Lacks

IC: concentración inhibitoria media

MAPKs: mitogen-activated protein kinases - quinasas de proteínas activadas por mitógenos

MDAR: monodeshidroascorbato reductasa

POX: peroxidasa

ROS: reactive oxygen species - especies reactivas de oxígeno

RuBisCo: ribulosa-1,5-bisfosfato carboxilasa/oxigenasa

SOD: superóxido dismutasa

UE: Unión Europea

VIH: virus de la inmunodeficiencia humana

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	3
2.1. Objetivo General	3
2.2. Objetivos Específicos	3
3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	5
3.1. Plantas halófitas: características generales y mecanismos de tolerancia a la salinidad	5
3.2. <i>Arthrocaulon macrostachyum</i>	7
3.2.1 Taxonomía, hábitats, botánica y ecología	7
3.2.2 Características fisiológicas y bioquímicas	12
3.2.3 <i>Usos alimentarios y en biomedicina</i>	20
3.3 Fitorremediación de suelos	32
3.3.1 El problema de la contaminación y degradación de suelos	32
3.3.2 Tipos de fitorremediación	35
3.3.3 Agricultura salina	39
3.3.4 Aplicaciones de <i>Arthrocaulon macrostachyum</i> en fitorremediación y agricultura salina	40
4. CONCLUSIONES	46
5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48

Índice de tablas

Tabla 1: Clasificación taxonómica de *Arthrocnemum (Arthrocaulon) macrostachyum* (EINaker *et al.*, 2020)

Tabla 2: Compuestos bioactivos encontrados en *A. macrostachyum* y su actividad (El-Amier *et al.*, 2022; EINaker *et al.*, 2020).

Tabla 3: compuestos bioactivos de *A. macrostachyum* con actividad en humanos.

Índice de figuras

Figura 1: Adaptado al español de Halophytes and Heavy Metals: Interesting Partnerships (Nikalje *et al.*, 2019)

Figura 2: Hábitat de *A. macrostachyum* (en negro) (Ramírez *et al.*, 2022).

Figura 3: Efecto antifúngico a distintas concentraciones de extracción con hexano (Eijaz *et al.*, 2021).

Figura 4: Efecto antibacteriano con distintas concentraciones de extractos con metanol (Eijaz *et al.*, 2021).

Figura 5: Efecto antibacteriano con diferentes concentraciones de extracto de etil acetato (Eijaz *et al.*, 2021).

Figura 6: Representación esquemática adaptada al español sobre la toxicidad de metales pesados en las plantas y los mecanismos de resistencia establecidos por las halófitas (Lutts & Lefèvre, 2015).

1. INTRODUCCIÓN

La planta *A. macrostachyum* ha demostrado ser una especie de gran importancia en el ámbito de la fitorremediación debido a su destacada capacidad para remediar diferentes tipos de contaminantes en el suelo, agua y aire. Esta halófito, perteneciente a la familia de las *Amaranthaceae* ha sido ampliamente estudiada por su habilidad para tolerar y acumular metales pesados en su biomasa. Esta planta ha demostrado una alta capacidad de fitoextracción, es decir, la capacidad de absorber y acumular selectivamente contaminantes, especialmente metales traza, a través de sus raíces y posteriormente en sus tejidos vegetales. Esta característica ha despertado un gran interés en la comunidad científica, ya que puede ser utilizada para remediar suelos contaminados con metales pesados, reduciendo así su toxicidad y mejorando la calidad del suelo.

La eficacia de *A. macrostachyum* como fitorremediadora radica en varios mecanismos fisiológicos y bioquímicos que posee. En primer lugar, esta planta presenta una alta capacidad de absorción radicular, lo que le permite capturar eficientemente los metales pesados presentes en el suelo. Además, *A. macrostachyum* es conocida por su habilidad para acumular grandes cantidades de metales pesados en sus tejidos sin mostrar signos de toxicidad o inhibición del crecimiento. Esto se debe a su capacidad para transportar y distribuir los metales absorbidos en distintos compartimentos de la planta, como las raíces, el tallo y las hojas.

Además de su capacidad de acumulación, también exhibe mecanismos de tolerancia a los metales pesados. Estos mecanismos incluyen la producción y activación de enzimas antioxidantes, como la superóxido dismutasa y la catalasa, que protegen a la planta contra los efectos dañinos de los metales y reducen el estrés oxidativo.

La importancia de *A. macrostachyum* como fitorremediadora se extiende más allá de su capacidad de acumulación de metales pesados, ya que numerosos estudios han revelado la presencia de diversos compuestos bioactivos en sus

extractos, como antioxidantes, fitoquímicos y, polifenoles, entre otros. Estos compuestos, obtenidos principalmente de las partes aéreas de la planta, han demostrado poseer actividades biológicas significativas contra bacterias, virus y hongos patógenos. Esta planta posee una notable importancia debido a su potencial como fuente de compuestos que han despertado el interés de la comunidad científica debido a su capacidad para combatir enfermedades infecciosas y ofrecer alternativas terapéuticas a los tratamientos convencionales. De este modo, *A. macrostachyum* ofrece oportunidades para el desarrollo de productos alimentarios y suplementos nutricionales que brinden beneficios a la salud humana.

El presente estudio abordará los múltiples ámbitos de investigación relacionados con *A. macrostachyum* previamente mencionados, haciendo hincapié en sus características como fitorremediadora y en los compuestos bioactivos que presenta con eficacia farmacológica en seres humanos.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

El principal objetivo de este trabajo de revisión bibliográfica es:

- Exponer los diversos usos de la planta halófito *A. macrostachyum*.

2.2. Objetivos Específicos

Para el desarrollo del objetivo general, es preciso analizar los siguientes objetivos específicos:

- Contemplar el uso de compuestos bioactivos extraídos de *A. macrostachyum* como alternativa al uso de antibióticos, antivirales y antifúngicos con ciertos patógenos.
- Explicar los usos de *A. macrostachyum* como ingrediente funcional.
- Proponer alternativas de fitorremediación de suelos contaminados con metales pesados utilizando *A. macrostachyum*.
- Exponer los usos de *A. macrostachyum* como fitorremediador de suelos salinos.

3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

3.1. Plantas halófitas: características generales y mecanismos de tolerancia a la salinidad

Las plantas halófitas, que constituyen aproximadamente el 1% de la flora del planeta, son capaces de prosperar en suelos con una alta concentración de sales (600-700 mM de NaCl), pudiendo alcanzar hasta 1.02 M de NaCl. Pueden ser halófitas obligatorias o facultativas. Este tipo de plantas se caracteriza por presentar una serie de adaptaciones morfológicas, fisiológicas y bioquímicas que las habilitan para vivir en suelos salinos. Algunas plantas halófitas, como determinadas especies que habitan los manglares, tienen glándulas especializadas en sus hojas o tallos que excretan la sal acumulada. Estas glándulas eliminan el exceso de sal, ayudando a mantener niveles bajos de salinidad en los tejidos. Otras especies desarrollan raíces adventicias, que se originan desde los tallos o ramas cerca de la superficie del suelo. Estas raíces pueden crecer horizontalmente o hacia arriba, permitiendo a la planta captar agua dulce de áreas más profundas o áreas menos salinas y mantenerse hidratada (EINaker *et al.*, 2020). Las hojas, de gruesa cutícula, se originan desde los tallos o ramas cerca de la superficie del suelo. Las hojas también pueden tener hojas modificadas en forma, tamaño o estructura para reducir la superficie de evaporación y minimizar la absorción de sal. Por ejemplo, las hojas de muchas especies de halófitas son pequeñas y espinosas. Han desarrollado además una tolerancia a la deshidratación temporal, permitiendo que sus tejidos se sequen sin sufrir daños irreversibles, y rehidratarse rápidamente cuando se vuelven a encontrar condiciones húmedas (De La Torre, 2017).

En función del mecanismo empleado para su tolerancia a la sal, las halófitas pueden ser acumuladoras, excretoras o exclusoras de sal. Las acumuladoras de sal son capaces de absorber y acumular un alto contenido de sales totales (más específicamente sodio) en sus tejidos y producir una gran biomasa aérea. Las halófitas que excretan sal,

absorben sales y las excretan mediante glándulas o vejigas de sal, que conducen las sales del suelo al aire. Las halófitas que excluyen sal evitan que las sales entren en sus tejidos, resultando en bajas tasas de translocación de sal a los brotes. Los acumuladores perennes permitirían un período más prolongado de acumulación de sal a lo largo del año que los anuales. La arquitectura de la raíz y la tasa de crecimiento de las especies halófitas representan parámetros clave para su idoneidad como fitoextractor. Además, muchas especies de halófitas pueden exudar de las raíces varios compuestos que estimulan la actividad microbiana y enzimática del suelo, favoreciendo la descomposición de los detritos en materia orgánica (Ben Hamed *et al.*, 2021).

Numerosas plantas halófitas pueden hacer frente a varios estreses abióticos de manera simultánea, incluyendo la toxicidad por metales pesados. La tolerancia a la sal y a los metales pesados se basa en parte en mecanismos fisiológicos comunes, pudiéndose desarrollar fenómenos de tolerancia cruzada (De La Torre, 2017). Durante la tolerancia cruzada al estrés, dos o más tipos diferentes de vías activan una cascada de señalización. Estas diferentes vías de señalización pueden operar independientemente unas de otras dando el mismo tipo de respuesta, o interactuar entre sí para dar una respuesta final. Los mecanismos comunes de tolerancia a la sal y al metal de las halófitas se resumen en la Fig. 1. Participan diversos elementos como receptores o sensores de estrés, canales de calcio, cascada de MAPKs y factores de transcripción, además de fitohormonas, o la acumulación de solutos compatibles y la activación del metabolismo antioxidante (Hyogo *et al.*, 2010).

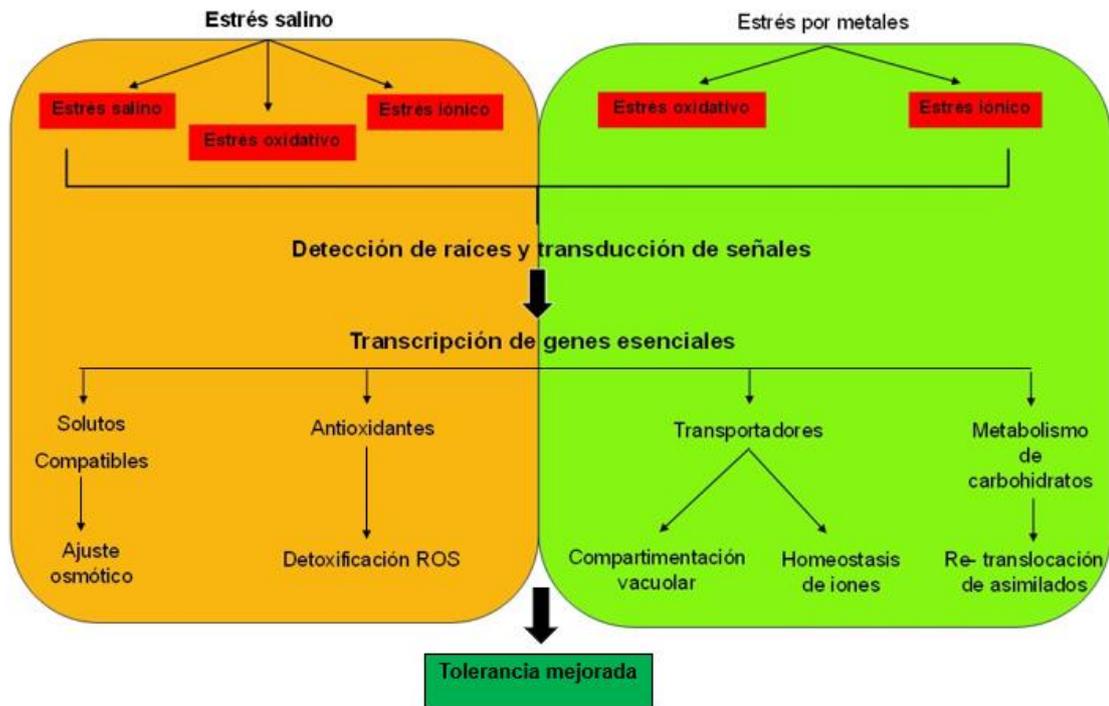


Figura 1: Adaptado al español de *Halophytes and Heavy Metals: Interesting Partnerships* (Nikalje et al., 2019)

3.2. *Arthrocaulon macrostachyum*

3.2.1 Taxonomía, hábitats, botánica y ecología

Taxonomía

Recientes estudios moleculares determinaron la separación taxonómica de *Arthrocnemum macrostachyum* norteamericano y euroasiático en dos nuevos géneros, *Arthroceras subterminale* y *Arthrocaulon macrostachyum* (Ball et al., 2017; Piirainen et al., 2017). La clasificación taxonómica de *A. macrostachyum* se recoge en la Tabla 1.

Tabla 1: Clasificación taxonómica de *Arthrocnemum (Arthrocaulon) macrostachyum* (EINaker et al., 2020)

Clasificación de <i>A. macrostachyum</i>	
Reino:	<i>Plantae</i>
Filo:	<i>Magnoliophyta</i>
Clase:	<i>Angiospermae</i>
Categoría:	<i>Eudicotiledóneas basales</i>
Orden:	<i>Caryophyllales</i>
Familia:	<i>Amaranthaceae</i>
Género:	<i>Arthrocnemum</i> (reclasificado como <i>Arthrocaulon</i> en 2017)
Especie:	<i>macrostachyum</i>

Las semillas de esta planta contienen cantidades considerables de aceite, entre el 22 y el 25%, y han sido utilizadas de forma tradicional como antibiótico y como antídoto contra las mordeduras de serpiente o picaduras de escorpión (EINaker et al., 2020).

Botánica

A. macrostachyum se conoce de forma tradicional en español como almajo, sosa alacranera, “espárrago de mar” o salado. Vive en climas secos y cálidos, en hábitats salinos que pueden alcanzar hasta 1,02 M de salinidad, puede sobrevivir a temperaturas de hasta 60 ° C y con poca agua. Es una planta que ha estado siempre presente en las culturas de la cuenca mediterránea, siendo parte de la dieta de los países de esta ubicación geográfica (EINaker et al., 2020).

En cuanto a su morfología, *A. macrostachyum* presenta un porte arbustivo erecto de hasta 150 cm, con ramas articuladas y artejos ciantiformes que tienen una terminación en reborde membranoso hialino. Sus tallos articulados de color entre verde y rojizo suele tener manchas

blanquecinas. Puede presentar dos tipos de ramas: unas más cortas que son las fértiles, y las más largas que no lo son. Carecen de una amplia lámina foliar, que se ha reducido a una escama aguda que se encuentra en la parte superior. Posee brácteas similares a hojas, que son además las que forman las ramas fértiles. Presenta flores hermafroditas, que se incrustan en la parte inferior de cada rama fértil sin separarse, por lo que cuando brota, queda un solo agujero por cada cima. Estas ramas fértiles presentan forma cilíndrica, y pueden estar solas o agrupadas en una inflorescencia paniculiforme. En condiciones de sequedad y durante los periodos más áridos, se ha observado que las raíces y tallos de la planta pueden manifestar una tonalidad ligeramente rojiza. Este fenómeno se atribuye a la activación de la biosíntesis de antocianinas y betacianinas en dichas estructuras, como un mecanismo de protección para salvaguardar la capacidad fotosintética de la planta. Además, se ha observado que las flores también pueden presentar algunos matices de este color, aunque es más frecuente encontrarlas en tonalidades blancas (Hamed *et al.*, 2021; Castroviejo, Coello 1980).

La reproducción sexual en *A. macrostachyum* involucra la formación de flores. Esto puede ocurrir de diferentes maneras, incluyendo la polinización por el viento, la polinización por insectos, la polinización por aves u otros animales. Una vez que el polen llega al pistilo y alcanza un óvulo, se produce la fertilización. El tubo polínico crece desde el polen hasta el óvulo y permite que los gametos masculinos se fusionen con los gametos femeninos, lo que da lugar a la formación de una semilla. Después de la fertilización, el óvulo fecundado se desarrolla y forma una semilla. La semilla contiene el embrión de la planta en desarrollo, rodeado por una cubierta protectora llamada tegumento. Las semillas pueden dispersarse de diversas formas, por el viento, el agua, los animales o incluso al ser liberadas por el propio fruto de la planta. Una vez que una semilla encuentra las condiciones adecuadas de luz, humedad, concentración de oxígeno y nutrientes, puede germinar y dar lugar a una nueva planta. La reproducción sexual con flores en las plantas angiospermas es un proceso complejo y altamente especializado que les

permite generar variabilidad genética y adaptarse a diferentes ambientes y condiciones (EINaker *et al.*, 2020; Yuan *et al.*, 2019)

A. macrostachyum también es capaz de realizar una reproducción asexual mediante propagación vegetativa por rizomas, que es un método que utiliza para expandirse y colonizar su entorno natural. Los rizomas son tallos subterráneos que crecen horizontalmente y pueden emitir raíces y brotes en sus nodos. En el caso de esta halófito, los rizomas se extienden bajo la superficie del suelo, permitiendo que la planta se propague lateralmente. A medida que el rizoma se expande, produce brotes laterales en los nodos. Este tipo de propagación es una estrategia adaptativa importante, que asegura que las nuevas plantas sean genéticamente idénticas a la planta madre, lo que ayuda a mantener las características y adaptaciones específicas de la especie en su entorno (EINaker *et al.*, 2020; Yuan *et al.*, 2019).

Hábitats y ecología

A. macrostachyum habita en zonas costeras en lugares como la cuenca de Mediterráneo hasta los litorales del Océano Atlántico, en el golfo arábigo incluyendo países como Emiratos Árabes y Pakistán, y en el delta de la costa de Egipto (Fig. 2). Son lugares por lo general con climas más áridos, con pocas precipitaciones y una incidencia del sol mayor. Se encuentra por lo general en zonas como manglares, marismas, pantanos, humedales, zonas áridas. La distribución de esta especie se debe en gran parte a su capacidad para adaptarse a condiciones de salinidad extrema y su adaptabilidad a climas áridos. En su hábitat natural, esta especie interactúa con otras plantas halófitas como lo son *Frankenia corymbosa*, *Sarcocornia fruticosa*, *Limonium cossonianum*, y *Juncus acutus*, formando comunidades vegetales de halófitas. Estas características del hábitat de *A. macrostachyum* evidencian su adaptación y especialización a condiciones ambientales específicas, lo cual contribuye a su éxito en los ecosistemas costeros y salinos donde se encuentra (De La Torre, 2017).

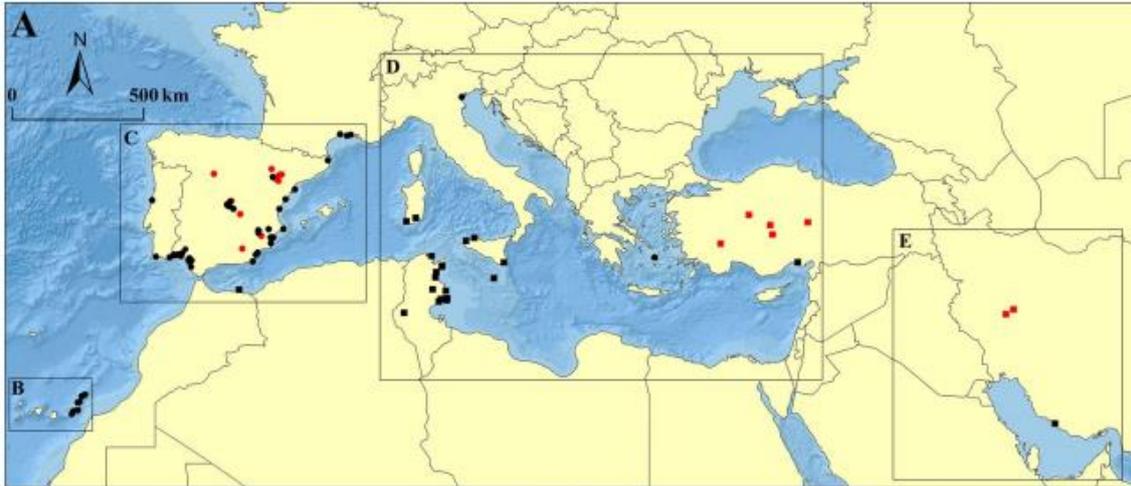


Figura 2: Hábitat de *A. macrostachyum* (en negro) (Ramírez *et al.*, 2022).

Es una planta que puede encontrarse en las regiones costeras mencionadas anteriormente, pero su presencia se ha visto amenazada debido a factores relacionados con la contaminación antropogénica, como la construcción en las marismas y en zonas costeras, además de por su vulnerabilidad a los cambios en el ambiente. La presencia de la *A. macrostachyum* en pantanos y humedales es muy importante, ya que esta especie juega un importante papel en la conservación de estos ecosistemas al brindar beneficios hidrológicos clave, como la atenuación de inundaciones, la estabilización de la costa, el control de la erosión y la purificación del agua. En las marismas saladas, *A. macrostachyum* forma densas agrupaciones de plantas de su misma especie que conforman un tapiz vegetal característico, creando un hábitat único que alberga una gran cantidad de especies animales, como aves migratorias, pequeños mamíferos, reptiles y crustáceos (El-Amier *et al.*, 2022). Desde el año 2001 se incluyó esta especie en el Catálogo de Especies Amenazadas debido a la alteración de su sensible hábitat, y en 2010 en España se la declaró especie de interés para los ecosistemas canarios (Accogli *et al.*, 2023).

3.2.2 Características fisiológicas y bioquímicas

A. macrostachyum, como planta de la familia *Amaranthaceae*, tiene un alto contenido en minerales, polifenoles, ácidos grasos y otros compuestos de interés. Presenta una gran cantidad de elementos inorgánicos como el sodio, potasio, magnesio y calcio dentro de sus tejidos (El-Amier *et al.*, 2022; ElNaker *et al.*, 2020).

Se han identificado dieciocho compuestos bioactivos en esta planta de interés farmacológico (Tabla 2). A continuación, se mencionan aquellos que tienen una evidencia sólida y se han probado satisfactoriamente en humanos (en amarillo). De entre ellos, los más relevantes son los que actúan como citotóxicos contra varios tipos de cáncer en humanos, como la **hesperidina**, que se ha utilizado para prevenir el cáncer de cuello uterino, con un IC50 (concentración inhibitoria media) = 2,86 µg/ml. El valor de IC50 representa una medida de la eficacia inhibitoria de una sustancia sobre una función biológica o bioquímica específica (ElNaker *et al.*, 2020). Es una métrica cuantitativa que indica la concentración requerida de una sustancia inhibidora específica, como un fármaco, para inhibir el 50% de un proceso biológico o componente biológico particular, cuando se evalúa *in vitro* (Balaguer Timor, 2016). La **hesperidina** realiza su acción al acoplarse a la proteína E6 del carcinoma del cuello uterino, generando una reacción citotóxica en la célula. Otro compuesto de interés es el **ácido quínico**, con una gran actividad antirretroviral para el tratamiento del VIH (Virus de la inmunodeficiencia humana) (IC 50 = 85,03 µg/ml), mayor que la del fármaco convencional doxorubicina, (IC 50= 40,3 µg/ml). Para el virus del Herpes simple se ha visto que el **ácido protocatecuico** (IC50 = 0,92 µg/ml) tiene una mayor capacidad antirretroviral que el fármaco aciclovir (IC50 = 1,43 µg/ml). También se ha detectado la presencia de **ácido málico** (IC50 = 3,35 µg/ml), que se caracteriza por ser inhibidor de la actividad alfa amilasa, al igual que la **ramnetina** (IC50 = 0,0233), con mejores resultados incluso que el fármaco acarbosa, que presenta un IC50 = 0,016 µg/ml. Del mismo modo, se detectaron compuestos que ayudan al control de glucosa en sangre en pacientes con diabetes como el **aldehído protocatecuico**, que disminuye

la secreción de glucosa hepática al reducir la actividad de la enzima glucosa-6-fosfatasa en un 18%, mientras que aumenta de 1,5 a 2,5 veces la secreción de glucógeno sintasa comparado con el fármaco DMSO (dimetilsulfóxido) (EINaker *et al.*, 2020).

Tabla 2: Metabolitos en *A. macrostachyum* que con bioactividad comprobada. (El-Amier *et al.*, 2022; EINaker *et al.*, 2020).

Compuesto	Función
Derivados del ácido quínico con grupos cafeoilo	Actividad antioxidante
Ácido quínico	Actividad anti-VIH-1-RT
Ácido málico	Actividad inhibidora de la α -amilasa
Ramnetina	Inhibidor de la α -amilasa
Ramnetina-3- O - β - D - glucurónido-600-metil éster	Antiinfluenza: virus de la influenza A (H1N1)
	Efecto inhibidor de la neuraminidasa
Hiperósido quercetina 3- O - β - D -galactósido	Efectos similares a los antidepresivos en ratones, posiblemente mediados por el sistema monoaminérgico y la regulación positiva del nivel del factor neurotrófico derivado del cerebro
	3,75 mg/kg—comparable a la fluoxetina (15 mg/kg)
Hesperitina-7-rutinósido	Actividad citotóxica contra las células HeLa
	Actividad anticancerígena confirmada por estudio de acoplamiento molecular <i>in silico</i>
	Exhibió una fuerte interacción con la proteína E6 del carcinoma de cuello uterino HPV16 con una energía de unión significativa = -5,58 kcal/mol
	Actividad inhibidora de la anticolinesterasa
Quercetina	Actividad antioxidante
	Los inhibidores de la colinesterasa están comúnmente aprobados para la terapia de la enfermedad de Alzheimer que debería restaurar los niveles originales de acetilcolina en el cerebro.
Naringenina	Actividad antiestrogénica por % de inhibición de la actividad del estradiol (10,3–44 %) en concentraciones (0,5, 1 y 5 μ M)
	Efectos antioxidantes, antitumorales, antivirales, antibacterianos,

	antiinflamatorios, antiadipogénicos y cardioprotectores
Ácido p-cumarínico	Efecto antiproliferativo contra las células MCF-7
	Actividad antiulcerosa
	Actividad de inhibición de la tirosinasa
Ácido clorogénico	Efectos regenerativos que exhiben propiedades curativas.
	Mejora el cierre de heridas a 10 µg/ml
	Actividad de eliminación de ROS
	Actividad neuroprotectora
Derivados del ácido clorogénico	Citotoxicidad contra HCT-116
	Actividad antioxidante
	Actividad inhibidora de la transcriptasa inversa del VIH-1
Derivado del ácido cafeico	Actividad antioxidante
Sinergia del ácido clorogénico y el ácido cafeico	Regula el metabolismo de la glucosa en la línea celular HepG2 resistente a la insulina.
Ácido protocatecuico	Actividad anti-HSV2 IC 50= 0,92 µg/ml en comparación con Aciclovir
	Actividad antioxidante para inhibir la formación de peróxidos
Aldehído protocatecuico (3,4-dihidroxibenzaldehído)	Actividad antidiabética mediante la modulación de la homeostasis de la glucosa en hepatocitos
Ácido 4-hidroxibenzoico	Correlacionado con la actividad de inhibición de la tirosinasa
	Actividad antioxidante
Ácido gálico	Actividad antifúngica frente a <i>Candida albicans</i>

A. macrostachyum contiene varios compuestos bioactivos más mencionados en la Tabla 2, pero sus estudios aún se mantienen en fase de investigación *in vitro* o en ratones, por lo que no podemos asegurar su uso en seres humanos con fines terapéuticos. Sin embargo, los resultados arrojados por estos estudios han sido positivos, ya que se ha visto su eficacia frente al uso de fármacos tradicionales (EINaker *et al.*, 2020).

Otro de los efectos positivos atribuidos a *A. macrostachyum* es su poder antioxidante. Esto se debe en parte a su alto contenido en polifenoles, que

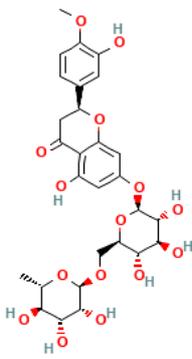
ayudan a combatir el envejecimiento celular (Eijaz *et al.*, 2021). Su capacidad antioxidante también se ve modificada por la cantidad de sal en el suelo, ya que una alta salinidad en el suelo aumenta su actividad neutralizante de radicales libres (Giordano *et al.*, 2021).

Una respuesta común a la exposición de la planta a agentes estresantes bióticos o abióticos es la acumulación de especies reactivas del oxígeno (ROS). Para evitar su acumulación excesiva, las plantas poseen un complejo sistema de defensa antioxidante incluyendo componentes no enzimáticos (ácido ascórbico o vitamina C, glutatión, α -tocoferoles o vitamina E y β -carotenos) y enzimáticos como la superóxido dismutasa (SOD), catalasa (CAT), peroxidasa (POX), ascorbato peroxidasa (APX), y las enzimas del ciclo ascorbato-glutatión (monodehidroascorbato reductasa, MDAR; glutatión reductasa, GR; glutatión peroxidasa, GPX; glutatión-S-transferasas, GST) entre otras. Aunque los mecanismos de producción y toxicidad de ROS son comunes en glicofitas y halófitas, las estrategias de detoxificación mediadas por el metabolismo antioxidante varían en respuesta a la salinidad. En este sentido, los estudios muestran que las halófitas tienen una mayor actividad de defensa antioxidante de manera constitutiva, debido a mayores niveles y variedad de los componentes enzimáticos mencionados anteriormente. Estas enzimas desempeñan un papel crucial en la eliminación y detoxificación de ROS, minimizando así el daño oxidativo a los componentes celulares. Además, en condiciones de salinidad, nuevas isoenzimas pueden ser inducidas en determinados compartimentos celulares (Ozgun *et al.*, 2013).

Por otra parte, *A. macrostachyum* tiene un perfil nutricional muy rico en flavonoides, compuestos fenólicos y alcaloides. Además, las semillas de esta especie tienen diversas propiedades fisiológicas dependiendo de los distintos ecotipos encontrados en las zonas de origen. Las muestras originarias de países como Emiratos Árabes (39 mg/g de flavonoides) y Portugal (41,9 mg/g de flavonoides) mostraron un mayor contenido total de compuestos fenólicos, como son el ácido clorogénico, el ácido gálico, ácido protocatecuico, ácido p-cumarínico, ácido rosmarínico y el ácido cafeico. En relación al contenido de antocianinas, se ha observado que

existe una correlación significativa entre la salinidad del suelo y el aumento en la concentración de estas sustancias cuando se cultivan plantas en suelos con bajos niveles de nitrógeno (EINaker *et al.*, 2020). La acumulación de antocianinas en respuesta a la salinidad y al estrés oxidativo se considera un mecanismo adaptativo en las plantas. Las antocianinas actúan como antioxidantes no enzimáticos, lo que añade un papel adicional al metabolismo antioxidante en la protección celular, como se ha descrito anteriormente (Accogli *et al.*, 2023). Además, *A. macrostachyum* contiene proto-antocianinas, como los taninos, que son polímeros condensados de flavonoides. Estos taninos pueden encontrarse distribuidos en la planta en concentraciones que oscilan entre 0,05 y 7,5 mg por gramo de peso seco. Sin embargo, es importante tener en cuenta que estas concentraciones pueden variar dependiendo del método de extracción utilizado y del disolvente empleado (Chekroun-Bechlaghem *et al.*, 2019; EINaker *et al.*, 2020). Su contenido en flavonoides también es destacable, presentando estas sustancias en formas como quercetina, naringenina, hesperidina y ramnetina que pueden variar sus concentraciones desde 0,09 mg/g a 71,6 mg/g (Sánchez-Gavilán *et al.*, 2021) Su similitud en estructura puede apreciarse en la tabla 3.

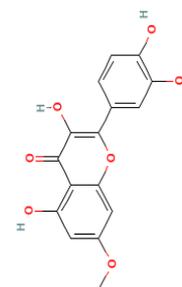
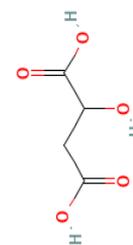
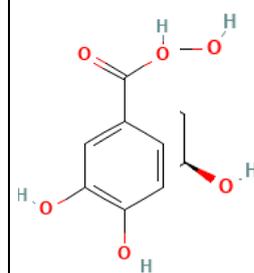
Tabla 3: compuestos bioactivos de *A. macrostachyum* con actividad en humanos.

Compuestos bioactivos	Actividad	Forma química
Hesperidina	<p>Hesperidina (hesperetina 7-O -β-rutinósido) y su aglicona hesperetina (4'-metoxi-3',5,7-trihidroxiflavanona) son flavonoides que pueden encontrarse abundantemente en especies cítricas como pomelos, limones y naranjas. Estudios respaldan que posee diversas actividades farmacológicas como efectos cardioprotectores, neuro-protectores, anticancerígenos, antidiabético, antimicrobiano, antiinflamatorio y antioxidante. Se ha probado en muchos estudios pre clínicos debido a que se ha visto tiene una actividad citotóxica, al unirse a receptores de las proteínas E6 de las células cancerosas, y suprimiéndolo, lo que provoca la pérdida de la capacidad reproductora de la célula. También se ha visto su asociación a la apoptosis de estas células al unirse a sus receptores (Bax, CK, and Caspase-3). Su capacidad cardio y neorprotectora se debe a su capacidad antioxidante (Fazary <i>et al.</i>, 2021).</p>	

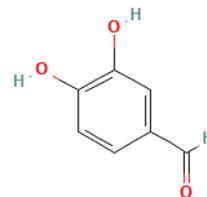
Ácido quínico

El ácido quínico es un ácido orgánico monobásico, que se extrae de los granos de café en su mayoría, pero puede extraerse también de otras especies de plantas como la cinchona, además, es el responsable del sabor astringente del café. Puede sintetizarse de forma sintética a partir del ácido clorogénico. El ácido quínico es un compuesto orgánico que exhibe diversas propiedades y actividades biológicas de interés. Entre sus propiedades se encuentra su capacidad antioxidante, la cual le confiere la capacidad de contrarrestar los efectos nocivos del estrés oxidativo generado por los radicales libres en las células. Esta propiedad antioxidante puede ser relevante en la prevención de daño celular y en la mitigación de enfermedades asociadas al estrés oxidativo. En cuanto a su efecto hepatoprotector, se ha observado que el ácido quínico muestra propiedades benéficas para el hígado. Estudios han revelado su capacidad para reducir la inflamación hepática y mejorar la función del hígado en diversas enfermedades hepáticas. Asimismo, se ha investigado el potencial neuroprotector del ácido quínico. Diversas investigaciones han demostrado su capacidad para proteger y preservar la función del sistema nervioso. Estos efectos neuroprotectores indican que el ácido quínico puede ser prometedor en la prevención o reducción del daño neuronal en condiciones neurodegenerativas. Además, el ácido quínico ha sido objeto de estudio por sus propiedades antiinflamatorias. Se ha observado que posee la capacidad de reducir la inflamación en el organismo, lo cual puede resultar beneficioso en el tratamiento de enfermedades inflamatorias como la artritis y las afecciones inflamatorias del intestino. Por último, se ha estudiado la actividad antimicrobiana del ácido quínico, sugiriendo su capacidad para inhibir el crecimiento de ciertos microorganismos, incluyendo bacterias y hongos.

	<p>Sin embargo, se requiere de investigaciones adicionales para determinar completamente su efectividad y los mecanismos de acción involucrados. Es importante destacar que gran parte de los estudios se han realizado en entornos de laboratorio o en modelos animales, y es necesario profundizar la investigación para confirmar y comprender plenamente las propiedades y beneficios del ácido quínico en seres humanos (Hyogo <i>et al.</i>, 2010).</p>
<p>Ácido protocatecuico</p>	<p>El ácido 3,4-dihidroxibenzoico es un ácido dihidroxibenzoico en el que los grupos hidroxilo están ubicados en las posiciones 3 y 4. Tiene un papel como metabolito xenobiótico humano, metabolito vegetal, agente antineoplásico, y un inhibidor procolágeno- prolina dioxigenasa. Está relacionado funcionalmente con un ácido benzoico. (Chang <i>et al.</i>, 2021).</p>
<p>Ácido málico</p>	<p>Tiene un papel como regulador de la acidez de los alimentos Es un ácido 2-hidroxidicarboxílico y un ácido C4-dicarboxílico. Está relacionado funcionalmente con un ácido succínico. Es un ácido conjugado de un malato (2-) y un malato. Se ha utilizado en ensayos que estudian el tratamiento de la xerostomía, la depresión y la hipertensión.</p>
<p>Ramnetina</p>	<p>La ramnetina es una monometoxiflavona que es una quercetina metilada en la posición 7. Tiene un papel como metabolito, antioxidante y agente antiinflamatorio. Puede encontrarse en especies como en <i>Ageratina altissima</i>, <i>Ammannia auriculata</i></p>



Aldehído protocatecuico	El 3,4-dihidroxibenzaldehído es un dihidroxibenzaldehído, también conocido como aldehído protocatecuico. Se encuentra en la cebada, los plátanos verdes o en las hojas de vid. Además, posee propiedades antiproliferativas y proapoptóticas contra las células de cáncer de mama humano y las células de cáncer colorrectal al reducir la expresión de los genes β -catenina y ciclina D1 (Chang <i>et al.</i> , 2021).
-------------------------	--



El valor de *A. macrostachyum* como alimento funcional se basa en su alto contenido en ácidos grasos poliinsaturados, que componen hasta un 75% del perfil lipídico de este alimento. Su consumo, ya sea de personas o animales, debe hacerse mientras la planta no madure, ya que adquiere sabores desagradables por su alto contenido en sal (Accogli *et al.*, 2023). Dentro de estos ácidos poliinsaturados, predomina el ácido α -linolénico y el ácido linoleico, teniendo este último un poder antiinflamatorio muy destacable que ayuda a prevenir enfermedades cardiovasculares y enfermedades degenerativas del sistema nervioso. También es considerable su contenido en fibra insoluble, con un contenido promedio de 34,3 g/100 de peso seco. Esta es una cantidad significativamente mayor que la de la mayoría de verduras, y junto con su contenido en potasio, magnesio, calcio y hierro hacen de *A. macrostachyum* un alimento muy nutritivo (El-Amier *et al.*, 2022).

3.2.3 Usos alimentarios y en biomedicina

Uso como ingrediente funcional y legislación

A. macrostachyum es una planta que ha sido parte de la cultura gastronómica de las civilizaciones en la cuenca del Mediterráneo desde hace siglos. Su uso en alimentación humana es limitado debido a su sabor salado y amargo, así como a su textura fibrosa. Por este motivo, los brotes maduros suelen descartarse, mientras que los brotes tiernos de la planta son más empleados, al ser suaves y no tener aún un sabor tan salado

como los anteriormente mencionados (Accogli *et al.*, 2023). Se están estudiando formas de procesar la planta para reducir su sabor salado y amargo y mejorar su textura además de evaluar las propiedades nutricionales y los posibles beneficios para la salud de los extractos de la planta (EINaker *et al.*, 2020).

En la última década, ha habido un incremento en el consumo de alimentos funcionales. Además, con frecuencia se pueden encontrar en conserva, ya sea en vinagre o en aceite, siendo utilizados como acompañamiento para aceitunas o pepinillos. También es posible encontrarlos frescos, especialmente durante el verano, después de ser recolectados, y se utilizan en una masa similar a la del pan para freírlos. En varias regiones de Italia, se ha observado un notable aumento en su uso en pizzas, pastas y ensaladas. Además de utilizar las ramas delgadas, muchas culturas aprovechaban sus semillas para obtener aceite (Accogli *et al.*, 2023).

El consumo de alimentos e ingredientes funcionales ha experimentado un notable incremento en popularidad en los últimos años, y este fenómeno se ha intensificado especialmente tras la pandemia de 2020, en la cual la salud se ha convertido en un valor prioritario para las personas. Además, el acelerado ritmo de vida actual ha llevado a una disminución en la planificación y consideración de la alimentación diaria, lo que ha generado una búsqueda de alternativas que permitan cumplir los objetivos nutricionales y, al mismo tiempo, aporten beneficios para la salud. El cambio en el estilo de vida de la población ha resultado en un impacto negativo evidente, con un aumento exponencial en el número de personas que padecen enfermedades relacionadas con una alimentación deficiente y un estilo de vida sedentario. Aunque es importante destacar que los alimentos e ingredientes funcionales no tienen la capacidad de curar o tratar enfermedades específicas, sí pueden brindar apoyo o contribuir de manera significativa a la dieta individual, favoreciendo mejoras en las condiciones de salud. En este contexto, los alimentos e ingredientes funcionales se presentan como una estrategia complementaria para la promoción de la salud y el bienestar, al proporcionar nutrientes específicos y compuestos bioactivos que respaldan funciones fisiológicas

y ayudan a mantener un equilibrio adecuado en el organismo. Aunque su efecto no puede ser considerado como una solución única, su inclusión en la alimentación diaria puede ofrecer un pequeño impulso hacia una dieta más saludable y, en consecuencia, contribuir a mejorar las condiciones de salud de los individuos (Alvídrez-Morales *et al.*, 2021; Accogli *et al.*, 2023).

Incorporación de A. macrostachyum como ingrediente funcional

Entre los compuestos bioactivos previamente mencionados de *A. macrostachyum* se encuentran los antioxidantes. El alto contenido de polifenoles presentes en esta planta, que son antioxidantes no enzimáticos, se extrae para ser aprovechado en el ámbito farmacológico o como aditivo alimentario con efectos conservantes. Esta propiedad se atribuye a la notable concentración de compuestos fenólicos, alcaloides, flavonoides y taninos presentes en la planta. El contenido promedio de compuestos fenólicos se estima en alrededor del 55% del peso en seco. Además de esto, se destaca la capacidad de la planta para eliminar radicales libres mediante la producción de antioxidantes de bajo peso molecular, como el glutatión, los carotenoides y la vitamina C o ácido ascórbico y la vitamina E o tocoferol, lo cual contribuye aún más a su actividad antioxidante (Sánchez-Gavilán *et al.*, 2021; Accogli *et al.*, 2023).

Los compuestos antioxidantes presentes en *A. macrostachyum* pueden ser aislados y añadidos a los alimentos en forma de polvo seco con el fin de enriquecerlos. De esta manera, el extracto resultante poseerá una mayor versatilidad en su aplicación en productos alimenticios. Para realizar estas extracciones se utilizan compuestos orgánicos como pueden ser etanol o metanol, que se usan para macerar las partes de la planta que se utilizarán para la extracción (solo se utilizan las partes aéreas de la misma). La maceración se realiza durante un tiempo determinado, generalmente en condiciones de temperatura y agitación controladas, para permitir la transferencia eficiente de los antioxidantes al disolvente (luego, la mezcla se filtra para separar los componentes sólidos de la disolución). También hay otro método de extracción, que comparte

la maceración en el disolvente orgánico como el método anterior, pero en vez de realizar la extracción con agitación, lo hace asistido de un ultrasonido. En este caso, se emplea un equipo de ultrasonido que emite ondas de alta frecuencia y energía en la muestra de planta sumergida en un disolvente. Las ondas ultrasónicas generan cavitación, que es la formación y colapso rápido de burbujas microscópicas en el disolvente. Este fenómeno produce una intensa agitación y turbulencia en la muestra, lo que mejora la transferencia de los antioxidantes al disolvente en un tiempo más rápido en comparación con la extracción convencional. Después de la extracción, la disolución obtenida se somete a procesos de concentración y purificación, como la evaporación o el uso de técnicas cromatográficas, para eliminar impurezas y obtener un extracto rico en antioxidantes. Este proceso de aislamiento es necesario para evitar que el fuerte sabor salado de esta especie altere el sabor de los alimentos a los que se le añade (Chekroun-Bechlaghem *et al.*, 2019; Giordano *et al.*, 2021).

Una vez extraído este compuesto antioxidante puede utilizarse de forma directa como polvo tras un secado con spray-dry o pulverización para incorporarse en fármacos o como ingrediente en alimentos. El proceso de secado mediante pulverización o spray-dry es una técnica ampliamente empleada para convertir líquidos o suspensiones en polvos secos. Se basa en la atomización de una solución o suspensión en pequeñas gotas finas mediante el uso de una boquilla o sistema de pulverización. Estas gotas son expuestas a un flujo de aire caliente o gases de secado, lo que facilita la rápida evaporación del solvente y la formación de partículas sólidas secas. El secado con spray-dry se lleva a cabo generalmente en una cámara de secado especializada. El líquido o suspensión a ser secado se introduce en la cámara a través de la boquilla o sistema de pulverización, donde se descompone en finas gotas. Al mismo tiempo, se introduce un flujo de aire caliente en la cámara, permitiendo la evaporación del solvente en las gotas y la generación de partículas secas. Este método de secado es ampliamente utilizado en diversas industrias, como la alimentaria, farmacéutica, química y de materiales, debido a las

ventajas que presenta. Esta técnica ofrece una serie de ventajas significativas en términos de eficiencia, control de tamaño de partícula, preservación de propiedades y facilidad de procesamiento a gran escala. Entre estas ventajas están una alta eficiencia de secado debido a la amplia área de superficie de contacto entre las gotas y el aire caliente, lo que promueve una evaporación rápida del disolvente y un secado eficiente. Además, el tamaño de las partículas secas puede ser controlado mediante la modificación de parámetros como la configuración de la boquilla, la velocidad de atomización y la temperatura del aire de secado. Esto brinda la posibilidad de obtener polvos con tamaños de partícula específicos según las necesidades del proceso o aplicación. El secado con spray-dry también permite la preservación de las propiedades y características de los compuestos o materiales presentes en la disolución o suspensión original. Al ocurrir el proceso de secado rápidamente a altas temperaturas, se minimiza la degradación o alteración de los componentes, lo que resulta beneficioso para la calidad del producto final. Además, este método es fácilmente escalable y adecuado para la producción a gran escala, ya que este proceso puede llevarse a cabo de manera continua, lo que facilita su implementación en operaciones industriales a gran escala (Chekroun-Bechlaghem *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2022).

Legislación y Declaraciones de propiedades saludables (DPS)

La Unión Europea (UE) cuenta con una normativa específica que regula los ingredientes funcionales en el ámbito alimentario. Esta normativa tiene como objetivo garantizar la seguridad de estos ingredientes y proteger la salud de los consumidores. Uno de los principales marcos legales es el Reglamento (Conformidad Europea) N° 1924/2006, que establece normas relativas a las declaraciones nutricionales y de propiedades saludables en los alimentos.

El Reglamento (CE) N° 1924/2006 define los requisitos para el uso de declaraciones nutricionales y de propiedades saludables en el etiquetado y la publicidad de los alimentos. Según esta normativa, una declaración

nutricional es cualquier mención que afirma, sugiere o implica que un alimento tiene propiedades nutricionales beneficiosas, como "alto en fibra" o "fuente de vitamina C". Por otro lado, una declaración de propiedades saludables es aquella que afirma, sugiere o implica que existe una relación entre el consumo de un alimento y la salud, como "ayuda a mantener niveles saludables de colesterol".

Para utilizar declaraciones nutricionales y de propiedades saludables, los ingredientes funcionales deben cumplir con criterios específicos establecidos en el Reglamento (CE) N° 1924/2006. Estos criterios se basan en evidencia científica sólida y deben estar respaldados por estudios y datos científicos relevantes y actualizados. La Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA) desempeña un papel fundamental en la evaluación de la evidencia científica presentada para respaldar las declaraciones nutricionales y de propiedades saludables. Hasta la fecha, la EFSA no ha publicado ninguna evaluación o estudio sobre la utilización de *A. macrostachyum* como ingrediente funcional. Los extractos de esta planta se emplean para la creación de ingredientes funcionales. La clave radica en la adición de los extractos de la planta en las proporciones adecuadas para respaldar una declaración funcional específica. En el contexto de la creación de ingredientes funcionales, se utilizan extractos de esta planta sin que existan regulaciones específicas que los rijan. Sin embargo, es fundamental garantizar la incorporación de los extractos en las proporciones adecuadas para respaldar una declaración funcional específica. En este sentido, la EFSA realizará un análisis cuidadoso de las cantidades de extracto de *A. macrostachyum* para garantizar la validez y eficacia de cualquier declaración funcional asociada.

Biomedicina

Las plantas generalmente se consideran la fuente primaria de compuestos bioactivos utilizados en la formulación de medicamentos empleados en la práctica médica contemporánea. El valor medicinal de las plantas suele recaer en sus compuestos bioactivos, como los fenoles,

alcaloides, flavonoides y terpenos, que han demostrado ser importantes agentes antimicrobianos. Por ejemplo, en países como Túnez se tiene registrado el uso de esta planta como antibiótico y como antídoto a algunos envenenamientos en animales o personas (El-Amier *et al.*, 2022).

El uso de *A. macrostachyum* se registra en medicina, desde las primeras civilizaciones instauradas en el golfo árabe, como antibiótico, antifúngico, y antiinflamatorio. Posee la mayor cantidad de alcaloides de entre los miembros de la familia *Amaranthaceae*, y por esto se la considera como una fuente importante de metabolitos que actúan como antibióticos. El alto contenido en compuestos fenólicos le brinda propiedades antioxidantes que pueden aprovecharse mediante extracción o bien al ingerir una parte de la planta (ElNaker *et al.*, 2020).

Entre los usos medicinales más importantes de *A. macrostachyum* han destacado el uso de sus hojas como agentes antiinflamatorios, debido a su capacidad para inhibir la desnaturalización de la proteína albúmina. Esto se debe a que los extractos antiinflamatorios de esta planta son hidrofóbicos, por lo que pueden reaccionar con distintas proteínas; en el caso de la albúmina, al unirse puede estabilizar su estructura al formar nuevos enlaces con la proteína. Esta misma propiedad es la responsable de su capacidad antimicrobiana, ya que estos extractos reaccionan con las proteínas de la pared celular de las bacterias para inhibir su metabolismo y romper sus paredes celulares, lo que conlleva a una inhibición del desarrollo de la misma (Osman *et al.*, 2021; Sánchez-Gavilán *et al.*, 2021).

También ayuda al tratamiento de enfermedades con un grado bajo de inflamación crónica como la Diabetes Mellitus, donde un aumento del estrés oxidativo causa esta inflamación crónica de bajo grado que puede alterar el metabolismo de lípidos y proteínas (Chekroun-Bechlaghem *et al.*, 2019). En cuanto a las proteínas, la diabetes mellitus puede afectar la estructura y función de estas moléculas esenciales. La hiperglucemia crónica en la diabetes puede inducir una serie de modificaciones en las proteínas a través de un proceso llamado glicación no enzimática. Esta

reacción química entre los azúcares y las proteínas conduce a la formación de productos finales de glicación avanzada, los cuales pueden alterar la estructura y función de las proteínas en diversos tejidos y órganos (Poznyak *et al.*, 2020).

En cuanto a la alteración del metabolismo de lípidos, en primer lugar, la resistencia a la insulina, que es una característica común de la diabetes mellitus tipo 2, juega un papel fundamental en la alteración del metabolismo lipídico. La insulina es una hormona clave en la regulación de la captación de glucosa y la síntesis de lípidos en los tejidos. En condiciones normales, la insulina promueve la absorción de glucosa y su conversión en ácidos grasos, que luego se almacenan en forma de triglicéridos en los tejidos adiposos. Sin embargo, en la resistencia a la insulina, los tejidos no responden adecuadamente a la acción de la insulina, lo que lleva a una disminución en la captación de glucosa y un aumento en la liberación de ácidos grasos por parte de los tejidos adiposos. Este aumento en los ácidos grasos libres circulantes contribuye a la acumulación de lípidos en los tejidos no adiposos, como el hígado, los músculos y el páncreas, y en los lípidos acumulados en los tejidos musculares pueden interferir con la captación de glucosa y contribuir a la resistencia a la insulina (Diamanti-Kandarakis & Dunaif, 2012).

Asimismo, se ha reportado el uso de esta planta para tratar infecciones fúngicas comunes causadas por *Aspergillus niger*, *Penicillium saccharomyces* y *Candida albicans*, entre otros microorganismos (Eijaz *et al.*, 2021). La extracción de los compuestos bioactivos arriba mencionados se realiza por distintos métodos; por ejemplo, para compuestos no polares se utiliza hexano, mientras que para los compuestos polares se utiliza cloroformo, etil acetato, o metanol, que aumentan la solubilidad de estos compuestos (Angurell *et al.*, 2016). Todos los compuestos utilizados se probaron en concentraciones de 250µg, 750µg, 1500µg, 3000µg, 4000µg, y 5000µg (Eijaz *et al.*, 2021).

Los extractos de *A. macrostachyum* obtenidos con hexano (figura 3), ricos en ácidos grasos como los ácidos esteárico y oléico, y en menor medida

beta-cariofileno, alfa-pineo, beta-sitosterol y estigmasterol, eliminaron completamente la presencia de hongos como *Penicillium*, *Aspergillus niger*, *Aspergillus flavus* y *Mucor spp*, mientras que para hongos como *Candida albicans* no se observó ningún efecto positivo (Eijaz *et al.*, 2021). Además, estos extractos demostraron la capacidad de inhibir el crecimiento de *Pseudomonas aeruginosa* de forma eficiente, mientras que el crecimiento de *Proteus mirabilis*, *Citrobacter freundii*, *Escherichia coli*, *Salmonella typhi*, *Salmonella paratyphi A*, y *Staphylococcus saprophyticus* no varió significativamente con ninguna de las dosis ensayadas. En el caso de *Streptococcus faecalis*, *Shigella dysenteriae*, *Enterobacter aerogenes*, *Staphylococcus saprophyticus*, *Staphylococcus aureus*, y *Klebsiella pneumoniae* tampoco se observó efecto inhibitorio alguno bajo ninguna concentración. La figura 4 muestra la actividad de este extracto a diferentes concentraciones, sobre las bacterias en las que hace efecto (Eijaz *et al.*, 2021; Ramasamy Santhanam *et al.*, 2018).

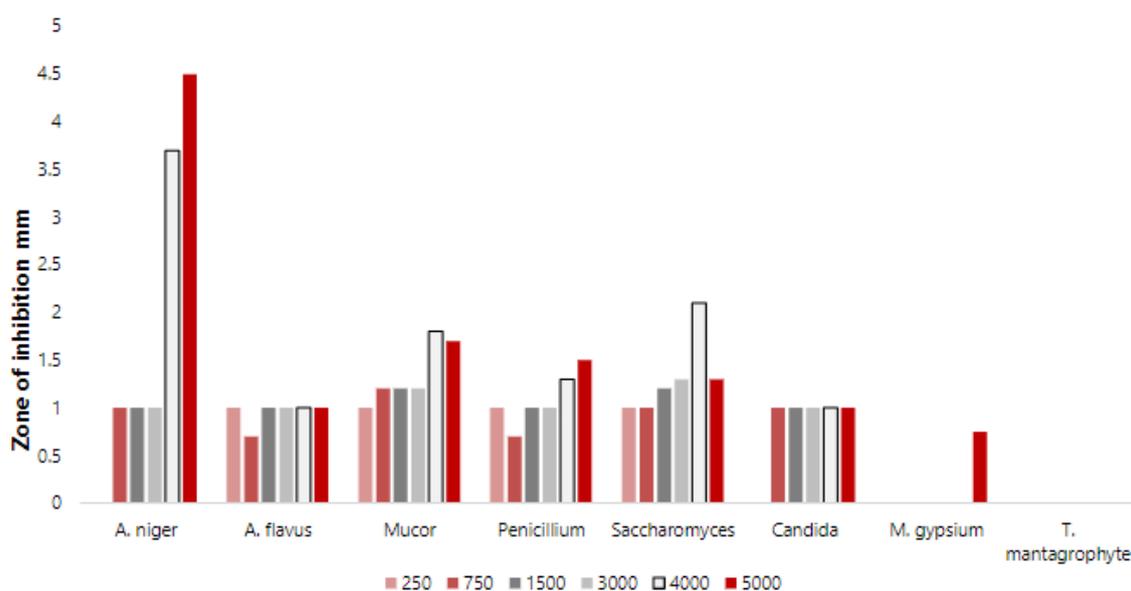


Figura 3: Efecto antifúngico a distintas concentraciones de extracción con hexano (Eijaz *et al.*, 2021)

Los extractos polares obtenidos mediante cloroformo fueron ricos en compuestos antiinflamatorios como ácidos fenólicos, flavonoides, y antioxidantes. Dichos extractos inhibieron el crecimiento fúngico de *Penicillium*, *Aspergillus*, *Saccharomyces* y *Candida* en un amplio rango de concentraciones que van desde los 250 a los 5000 µg disueltos en DMSO (dimetil sulfóxido); por el contrario, con este tipo de extracción, hongos como *Microsporium gypseum* y *Trichophyton mentagrophytes* no tuvieron ningún tipo de inhibición en su crecimiento. También se vio que tuvo eficiencia como agente antimicrobiano contra bacterias como *Salmonella typhi*, *Proteus mirabilis*, *Pseudomonas aeruginosa*, y *Staphylococcus saprophyticus*, pero un efecto no significativo en bacterias como *Citrobacter freundii* y *Enterobacter aerogenes* ni otras bacterias que también tienen una resistencia antibiótica como *Staphylococcus aureus*, *Staphylococcus epidermidis*, *Streptococcus faecalis*, *Shigella dysenteriae*, *Salmonella paratyphi A*, *Escherichia coli*, y *Klebsiella pneumonia*.

La extracción de ácidos grasos poliinsaturados mediante cloroformo tiene una reconocida actividad antimicrobiana que altera la fluidez de la membrana celular de las bacterias y provocan poros en las mismas. También se ha registrado su capacidad de inhibir la síntesis de proteínas y ácidos nucleicos bacterianos, mediante el uso estos extractos que iban en concentraciones preparadas con DMSO (dimetil sulfóxido) desde los 250 a 5.000 µg, y se compararon con antibióticos comunes como ampicilina, eritromicina, estreptomina, entre otros (Eijaz *et al.*, 2021; Ramasamy Santhanam *et al.*, 2018).

Los extractos obtenidos mediante el uso de metanol y hexano son particularmente eficaces en términos de su efecto antifúngico (figura 3 y 4). Además, se ha comprobado que la concentración de estos extractos desempeña un papel significativo en su eficacia antifúngica, mostrando variaciones en los efectos según las distintas concentraciones utilizadas (Eijaz *et al.*, 2021; Ramasamy Santhanam *et al.*, 2018).

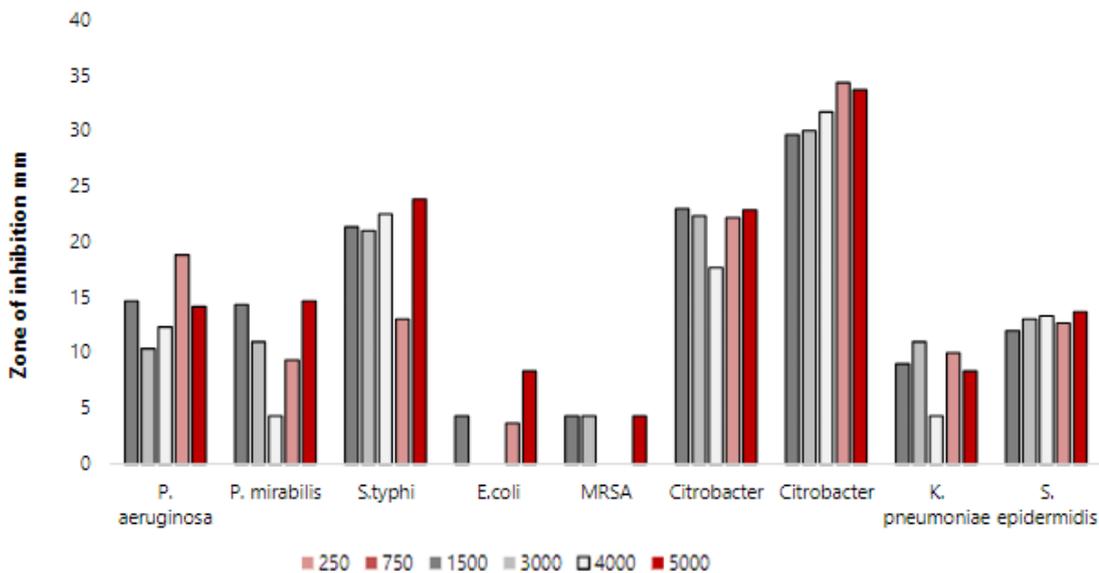


Figura 4: Efecto antibacteriano con distintas concentraciones de extractos con metanol (Eijaz et al., 2021)

En su uso como antibiótico se ha visto eficacia ante microorganismos resistentes a los antibióticos como *Staphylococcus aureus*, *Staphylococcus epidermidis* y *Staphylococcus saprophyticus*, que son resistentes a la meticilina, las *Pseudomonas aeruginosa*, *Streptococcus* y *Shigella*, entre otras. Las extracciones con metanol tienen un efecto significativo contra bacterias como *Staphylococcus saprophyticus* y *epidermidis*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Proteus mirabilis*, *Salmonella typhi*, *Citrobacter freundii*, *Klebsiella pneumoniae*, *Escherichia coli* y *S. aureus* resistente a la meticilina; pero con *Streptococcus faecalis*, *Shigella dysenteriae*, *Enterobacter aerogenes*, y *Salmonella paratyphi A* no hubo ningún efecto observable (Eijaz et al., 2021).

Los extractos con etil acetato (figura 5) también demostraron eficacia contra *Proteus mirabilis*, pero en el caso de *Citrobacter freundii* y *E. coli* el efecto fue mucho menor. Para bacterias como *Salmonella typhi*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Klebsiella pneumoniae*, y el *Staphylococcus aureus* y *Salmonella paratyphi* resistentes a la meticilina, no hubo efectos

significativos observables, tampoco hubo efecto para *Staphylococcus epidermidis*, *Streptococcus faecalis*, *Shigella dysenteriae*, *Enterobacter aerogenes*, y *Staphylococcus saprophyticus* (Eijaz *et al.*, 2021).

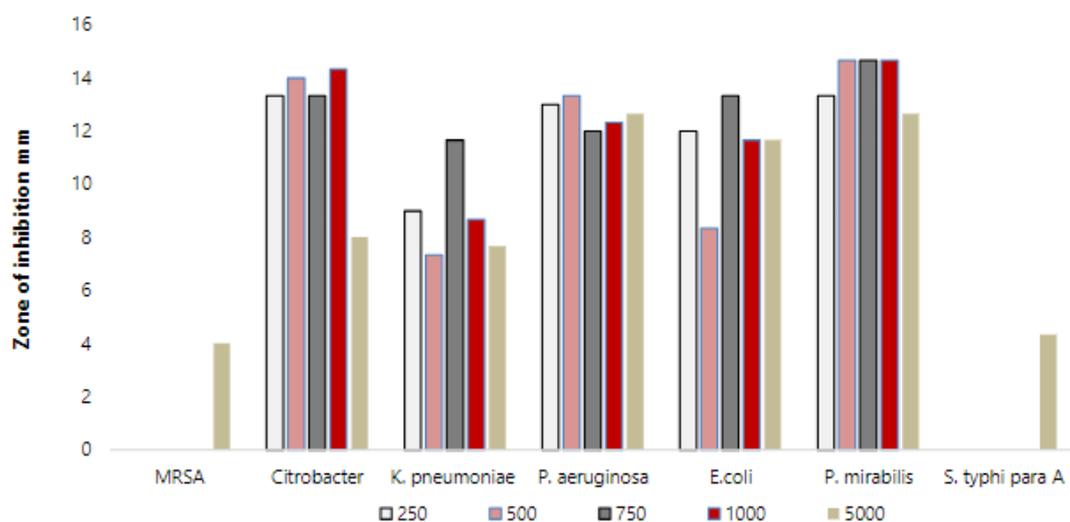


Figura 5: Efecto antibacteriano con diferentes concentraciones de extracto de etil acetato (Eijaz *et al.*, 2021)

Tras el análisis de eficacia de estos extractos, se determinó que los extractos más eficientes vienen del disolvente metanol, sin embargo, es importante recalcar que la acción antimicrobiana de estos extractos estaba directamente relacionada con su concentración en el solvente DMSO, encontrando una eficacia creciente hasta concentraciones de 5.000 µg/g, a partir de las cuales no aumenta su eficacia y se estabiliza. Según los estudios analizados, los extractos de *A. macrostachyum* son eficientes en el tratamiento de infecciones microbianas y fúngicas, pudiendo ser un candidato ideal para reemplazar el uso de antibióticos que promueven la resistencia a los mismos por parte de los microorganismos (Eijaz *et al.*, 2021; Ramasamy Santhanam *et al.*, 2018).

3.3 Fitorremediación de suelos

3.3.1 El problema de la contaminación y degradación de suelos

El suelo es uno de los recursos naturales más importantes y valiosos del planeta. Es un recurso limitado y no renovable que sustenta la vida en la Tierra al proporcionar nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas, que a su vez son la base de la cadena alimentaria de todos los seres vivos. Además, el suelo también actúa como un filtro natural, purificando el agua y el aire y proporcionando un hábitat para una amplia variedad de organismos (Wackernagel, 2001).

La contaminación del suelo con metales pesados es un problema ambiental grave que afecta a muchas regiones del mundo. Los metales pesados son elementos químicos que se encuentran naturalmente en el suelo, pero también pueden ser liberados en el medio ambiente por actividades humanas como la minería, la fabricación de productos químicos y la eliminación de residuos. Los metales pesados pueden persistir en el suelo durante décadas y acumularse en la cadena alimentaria, lo que representa una amenaza para la salud humana y el medio ambiente (Wackernagel, 2001; Li *et al.*, 2019; Youghly *et al.*, 2020).

La salinización de los suelos es una de las principales causas de degradación de suelos a nivel global. Un suelo se considera salino si la conductividad eléctrica de su extracto de saturación, medido a 25 °C, es superior a 4 dS m⁻¹, la concentración de sal es $\geq 0.25\%$ y el pH es < 8.5 . La salinidad en el suelo se debe mayoritariamente a la acumulación de sal común (NaCl), pero también a la acumulación de carbonatos y sulfatos de calcio, magnesio y potasio. Los iones de sal tienen la capacidad de adsorberse a las partículas del suelo, especialmente a las arcillas y a los coloides presentes en el suelo. Esta adsorción ocurre a través de la formación de enlaces iónicos con las cargas negativas de las partículas del suelo, lo que conlleva a una acumulación de sal en la matriz del mismo. Esta acumulación de sal puede generar restricciones en la

disponibilidad de agua para las plantas y ejercer un impacto negativo en su crecimiento (Gamalero *et al.*, 2020).

Se estima que alrededor del 7% de las tierras agrícolas del planeta están afectadas por la salinidad. Esta salinización puede ser resultado tanto de factores naturales como de actividades humanas. Los factores naturales que contribuyen a la salinización del suelo incluyen la presencia de depósitos de sal subterráneos, la elevada evaporación de agua en zonas áridas y semiáridas, y la intrusión de agua salada en los acuíferos y sistemas de riego costeros. Sin embargo, las actividades humanas también desempeñan un papel significativo en la salinización de suelos. La irrigación inadecuada es una de las principales causas de salinización a nivel mundial. El uso excesivo de fertilizantes también puede contribuir a la salinización, ya que muchos fertilizantes contienen sales que pueden acumularse en el suelo con el tiempo. La salinización de los suelos tiene importantes consecuencias para la agricultura y la producción de alimentos. Las sales en altas concentraciones pueden ser tóxicas para las plantas, limitando su crecimiento y reduciendo los rendimientos. Además, la salinidad puede alterar la estructura del suelo, disminuyendo su capacidad para retener agua y nutrientes, lo que afecta aún más al crecimiento de las plantas (Gamalero *et al.*, 2020; Saghafi *et al.*, 2019).

La salinidad en el suelo juega un papel importante en la forma en que los metales pesados se presentan y se distribuyen en el medio ambiente. Cuando hay presencia de salinidad, los metales pesados tienden a volverse más móviles debido a su asociación con los aniones derivados de la sal, formando complejos. Estos complejos compiten con los cationes derivados de la sal y los iones de metales pesados por lugares específicos de adsorción en la fase sólida. La competencia entre el complejo y los cationes puede variar su afinidad ampliamente dependiendo de factores como el pH, la presencia de otros elementos químicos, la actividad microbiana, la materia orgánica y la presencia de otras sustancias en el medio ambiente (Ahmadi *et al.*, 2022).

Además, varios aspectos fisiológicos que son directamente afectados por metales pesados también se ven afectados por la salinidad. Por lo tanto, se plantea la hipótesis de que las plantas que son naturalmente resistentes a la salinidad pueden mostrar propiedades adaptativas prometedoras para poder sobrellevar la presencia externa o incluso la acumulación de metales pesados en sus tejidos (Lutts & Lefèvre, 2015).

Los suelos afectados por la salinidad ejercen un impacto negativo en la biodisponibilidad de nutrientes esenciales para las plantas. Esta salinidad también provoca una disminución en la fertilidad del suelo, principalmente debido a la elevada concentración de iones como el sodio y los carbonatos, los cuales afectan la disponibilidad de otros iones esenciales como el calcio, fósforo, manganeso, hierro y zinc. Entre estos nutrientes, la disminución de fósforo es especialmente preocupante, ya que juega un papel crucial en el desarrollo y crecimiento de las plantas. La acidificación del suelo es un factor que favorece el incremento en la biodisponibilidad de metales pesados, lo que resulta en una competencia con los nutrientes esenciales presentes en el suelo y necesarios para el crecimiento de las plantas (Ahmadi *et al.*, 2022).

3.3.2 Tipos de fitorremediación

La fitorremediación es un proceso de remediación ambiental que utiliza plantas para reducir la cantidad de contaminantes en el suelo, en el agua y en el aire. La fitorremediación se considera una técnica de remediación "verde" ya que utiliza organismos vivos y procesos naturales para descontaminar el medio ambiente. En la fitorremediación, las plantas son utilizadas como "bomba" o "esponja" natural para absorber los contaminantes del medio ambiente y transformarlos en formas menos tóxicas o inactivas (Liang LiChen *et al.*, 2017).

Las plantas utilizadas en la fitorremediación tienen la capacidad natural de extraer contaminantes del suelo o del agua a través de sus raíces y acumularlos en sus tejidos. Los principales contaminantes que pueden ser

remediados mediante la fitorremediación incluyen metales pesados, sales, solventes orgánicos, pesticidas y compuestos orgánicos persistentes (Delgadillo-López *et al.*, 2011; Liang LiChen *et al.*, 2017). Los mecanismos celulares de resistencia a metales pesados en halófitas se presentan en la Figura 6.

Existen diferentes mecanismos a través de los cuales las plantas pueden llevar a cabo la fitorremediación. La fitorremediación es, por añadidura, una opción económica en muchos casos, especialmente cuando se trata de grandes extensiones de suelo contaminado (Delgadillo-López *et al.*, 2011; Gamalero *et al.*, 2020).

Con *A. macrostachyum* se pueden distinguir 3 diferentes enfoques de fitorremediación de suelos, tales como:

Fitoextracción: se basa en la capacidad de las plantas para absorber selectivamente contaminantes, especialmente metales traza, a través de sus raíces y acumularlos en grandes cantidades en la parte aérea de la planta. Posteriormente, estos contaminantes pueden ser removidos del suelo mediante la cosecha de la biomasa vegetal, para disponerse de ellos correctamente.

Fitoestabilización: a través de diversos mecanismos, las plantas exhiben la capacidad de capturar o retener los contaminantes en las raíces o en su entorno cercano. Esta acción de secuestro o inmovilización de los contaminantes ejerce un efecto limitante sobre su migración y disponibilidad, resultando en una notable reducción de los potenciales impactos adversos al medio ambiente y su posterior transferencia a través de la cadena trófica.

Rizodegradación: Las raíces de las plantas emiten ciertos compuestos llamados exudados hacia el suelo que las rodea, específicamente en la zona conocida como rizosfera. Estos exudados tienen la capacidad de estimular la supervivencia, el crecimiento y la actividad de los microorganismos presentes en la rizosfera, los cuales son responsables de la degradación de los contaminantes orgánicos. Para mejorar la

eficacia de esta técnica, se pueden introducir microorganismos especializados en la degradación de contaminantes orgánicos, aumentando así su biodisponibilidad. Además, es posible potenciar los procesos de simbiosis entre las plantas y los microorganismos mediante la adición de compuestos que estimulan dicha interacción (Delgadillo-López *et al.*, 2011; Liang LiChen *et al.*, 2017).

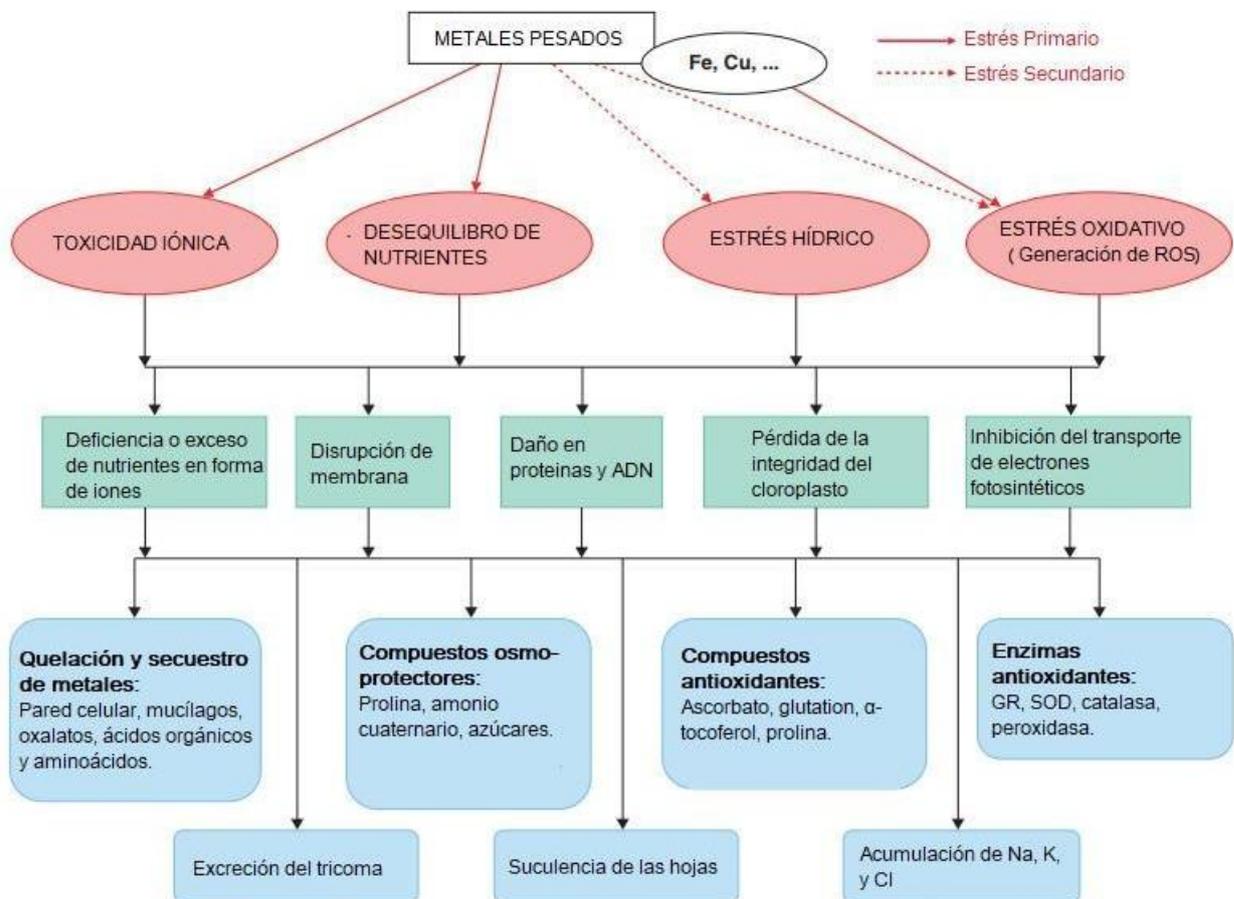


Figura 6: Representación esquemática adaptada al español sobre la toxicidad de metales pesados en las plantas y los mecanismos de resistencia establecidos por las halófitas (Lutts & Lefèvre, 2015).

Contaminación con cadmio

La contaminación del suelo con cadmio es un grave problema ambiental global. Este metal tóxico se encuentra en la tierra de forma natural y se libera al medio ambiente debido a actividades humanas como la minería y el uso de fertilizantes y pesticidas. El cadmio puede persistir en el suelo durante mucho tiempo, acumulándose en la cadena alimentaria y representando un riesgo para la salud humana y el medio ambiente. La contaminación del suelo con cadmio tiene impactos negativos en la salud, afecta la calidad del agua y del aire, y disminuye la biodiversidad (Genchi *et al.*, 2020; Li *et al.*, 2019).

Cuando las plantas absorben cadmio, a diferencia de otros metales, distribuyen sus iones de forma equitativa por todos sus tejidos y migran hacia las hojas, frutas y semillas al ingresar por las raíces. Sin embargo, cuando se produce una absorción de cadmio a niveles tóxicos, se genera una interrupción en las reacciones metabólicas de la planta, lo que puede conducir a un estrés oxidativo y daño en el ADN y la membrana celular (Lutts & Lefèvre, 2015). Los estudios de Nikalje *et al.* (2019) respaldan que la interrupción de las reacciones metabólicas puede ocasionar daños en las proteínas y provocar mutaciones genéticas. La fitotoxicidad del cadmio provoca alteraciones en la absorción de nutrientes minerales y la inhibición de la apertura de los estomas, lo que impide la movilización de agua y nutrientes hacia la parte aérea de la planta y, posteriormente, hacia los órganos de almacenamiento como los frutos. Esta deficiencia de agua también afecta negativamente la fotosíntesis, el metabolismo de los carbohidratos y el equilibrio de los antioxidantes en las plantas (Nikalje *et al.*, 2019; De La Torre, 2017).

En particular, este metal pesado puede alterar la actividad de las enzimas de la planta, que son proteínas que catalizan reacciones químicas esenciales para la vida de la misma. El cadmio puede unirse a las enzimas y cambiar su estructura, lo que puede afectar su actividad y, por lo tanto, interferir en procesos metabólicos cruciales para el crecimiento y desarrollo de la planta. Al unirse a las enzimas, el cadmio puede provocar

la inactivación de las mismas o una reducción en su actividad (DalCorso *et al.*, 2010).

En el caso de la fotosíntesis, el cadmio puede afectar directamente a los pigmentos fotosintéticos, como la clorofila, y a las enzimas que intervienen en la fotosíntesis, como la ribulosa 1-5-bifosfato carboxilasa/oxigenasa (RuBisCo). La clorofila es esencial para la absorción de la luz solar y la transferencia de energía a la cadena de transporte de electrones y la RuBisCo es la enzima responsable de la fijación del dióxido de carbono en la fotosíntesis. Si estas enzimas se ven afectadas por la presencia de cadmio, la fotosíntesis se puede ver seriamente comprometida, lo que puede reducir la producción de fotoasimilados y oxígeno en las plantas (Shaari *et al.*, 2022).

3.3.3 Agricultura salina

La agricultura salina es un tipo de agricultura que se lleva a cabo en suelos que presentan un alto contenido de sales solubles. Estos suelos se encuentran principalmente en áreas áridas y semiáridas, y suelen estar asociados con la acumulación de sales debido a la escasa precipitación y a la alta tasa de evaporación del suelo. Implica una serie de desafíos para los agricultores, ya que los niveles elevados de sal pueden limitar el crecimiento y el rendimiento de los cultivos. Uno de los métodos de la agricultura salina es el uso de cultivos tolerantes a la sal, que son capaces de crecer y desarrollarse en suelos con altos niveles de sal. Otra opción es el uso de sistemas de riego por goteo, que permiten reducir la cantidad de agua salina utilizada y asegurar un suministro adecuado de agua para las plantas (Liang LiChen *et al.*, 2017; De La Torre, 2017).

Además, el uso de fertilizantes que ayudan a las plantas a resistir la salinidad del suelo también es una estrategia común en la agricultura salina. Estos fertilizantes pueden proporcionar nutrientes adicionales que ayudan a las plantas a crecer en ambientes salinos y resistir los efectos negativos de la sal en el suelo (Osman *et al.*, 2021). Los fertilizantes

utilizados en agricultura salina suelen ser de origen orgánico, como lo son el compostaje, abonos verdes, residuos de procesamiento de alimentos, y estiércol de animales de granja. Estos materiales se fermentan con cepas microbianas funcionales para mejorar la biodisponibilidad de nutrientes (Xiao *et al.*, 2022).

3.3.4 Aplicaciones de *Arthrocaulon macrostachyum* en fitorremediación y agricultura salina

A. macrostachyum es reconocida como una especie hiperacumuladora de cadmio, demostrando la capacidad de retener aproximadamente un 0,01% de cadmio en sus tejidos en relación al peso seco, lo que implica que exhibe una tolerancia excepcional para soportar la presencia de metales pesados, particularmente cadmio, en sus tejidos aéreos (Lutts & Lefèvre, 2015). Esta elevada tolerancia hacia la presencia de metales pesados en dicha especie puede ser atribuida a un mecanismo fisiológico compartido entre el estrés salino y el estrés provocado por la presencia de metales pesados en el suelo. La capacidad de resistir ambos problemas ambientales se debe a un mecanismo fisiológico común. Las plantas hiperacumuladoras de metales pesados, como *A. macrostachyum*, llevan a cabo procesos de desintoxicación de iones metálicos mediante diversas estrategias. Estas estrategias incluyen el mantenimiento del gradiente de potencial hídrico, secuestrando iones en las vacuolas, así como el aumento en la síntesis de solutos orgánicos para el ajuste osmótico y el incremento de la actividad antioxidante. Estas acciones permiten a la planta hacer frente a la acumulación de metales pesados y minimizar los efectos negativos asociados a su presencia (Aziz & Mujeeb, 2022).

Arthrocaulon macrostachyum y remediación de metales pesados

Se basa en la capacidad que tiene *A. macrostachyum* para acumular, metabolizar y transformar los contaminantes. Esta planta es

capaz de absorber los contaminantes a través de sus raíces y transportarlos a través de sus tejidos hasta las hojas y otros órganos. Una vez que los contaminantes se han acumulado en la planta, pueden ser eliminados a través de la evaporación, la transpiración, la caída de hojas o la cosecha de *A. macrostachyum* para su posterior eliminación. Una vez que las plantas han acumulado los metales en sus tejidos aéreos, se procede a su cosecha y posterior transporte con el propósito de su disposición en un vertedero controlado, su incineración o su compostaje. En el caso de la incineración de las plantas, es imperativo destacar que las cenizas resultantes contienen los metales previamente acumulados por las plantas y, en consecuencia, deben ser tratadas como residuos considerados tóxicos y peligrosos, siendo necesario su envío a instalaciones de vertido controlado. Ocasionalmente, cuando el valor económico así lo justifica, es viable realizar la recuperación de los metales presentes en las cenizas con el fin de utilizarlos posteriormente en procesos de reutilización y aprovechamiento (Liang LiChen *et al.*, 2017; Lutts & Lefèvre, 2015)

El mecanismo fisiológico de *A. macrostachyum* para extraer metales pesados consiste en la fitoextracción, y es eficiente debido a que los metales pesados pueden entrar a la célula a través de transportadores específicos que se encuentran en la membrana celular (Nikalje *et al.*, 2019). Las plantas tienen transportadores de tipo P que utilizan energía celular para transportar fosfato inorgánico a las vacuolas. Sin embargo, estos transportadores también pueden interactuar con metales pesados, como plomo y cadmio, compitiendo con el fosfato y afectando su absorción. Por otro lado, las plantas poseen proteínas de membrana que transportan activamente iones de metales pesados desde el citoplasma hacia las vacuolas, donde se acumulan en complejos metal-ligando, inactivando su toxicidad. Estos transportadores son específicos para diferentes metales pesados, como cobre o zinc, y desempeñan un papel importante en la homeostasis iónica y la respuesta adaptativa de las plantas ante la presencia de metales pesados. Estudios recientes demostraron que *A. macrostachyum* presenta cierta selectividad en la

acumulación de metales pesados. Por ejemplo, se ha encontrado que esta planta acumula más cadmio que otros metales pesados como el cobre y el zinc, lo que sugiere que puede haber transportadores específicos para cada metal pesado (Liang LiChen *et al.*, 2017; Shaari *et al.*, 2022).

Esta respuesta de la planta es una forma de adaptarse a las condiciones de estrés ambiental y de aumentar su capacidad para transportar los iones de metales pesados hacia las vacuolas (Shaari *et al.*, 2022). Esta capacidad también se ve influida por la presencia de otros nutrientes esenciales y puede afectar en la actividad de los transportadores de tipo P (Shaari *et al.*, 2022). Se ha demostrado que la exposición a altas concentraciones de metales pesados puede afectar la absorción y la movilidad de otros nutrientes como el hierro, el magnesio y el calcio, lo que puede disminuir la capacidad de la planta para crecer y sobrevivir. En consecuencia, la expresión de los genes que codifican para los transportadores de tipo P puede aumentar, lo que permite a la planta mantener un equilibrio adecuado de nutrientes esenciales y metales pesados en las diferentes partes de la planta. Una excesiva exposición a metales pesados puede llevar a cambios en la estructura de la membrana celular de *A. macrostachyum*, afectando a la actividad transportadora de tipo P. La permeabilidad se altera y se satura, disminuyendo la capacidad de la planta de absorber metales pesados del suelo (Genchi *et al.*, 2020).

La capacidad de *A. macrostachyum* para bioacumular cadmio en sus tejidos ha sido ampliamente documentada en estudios previos (Redondo-Gómez *et al.*, 2010). Esta especie presenta una notable tolerancia al cadmio, ya que no muestra cambios ni síntomas visibles de intoxicación, incluso en dosis elevadas de hasta 70 mg/kg. Sin embargo, dosis superiores afectan negativamente el crecimiento y desarrollo de *A. macrostachyum* al inhibir la asimilación fotosintética del carbono, debido a la competencia entre el cadmio y los nutrientes esenciales. Además, el cadmio interfiere con el ciclo de Calvin al afectar la función de una enzima clave en este proceso, la ribulosa difosfato

carboxihidrazona. Se ha observado que a medida que aumenta la concentración de cadmio en el suelo, la eficiencia de acumulación de *A. macrostachyum* de este metal pesado disminuye. Es importante destacar que la acumulación de cadmio en esta planta difiere de la acumulación de otros metales, ya que se concentra principalmente en las raíces y se transfiere en menor medida hacia los tejidos aéreos. Esta transferencia disminuye a medida que aumenta la concentración de cadmio en el suelo, pero aumenta conforme aumenta la biomasa de la planta. A pesar de esto, *A. macrostachyum* sigue siendo clasificada como una hiperacumuladora de cadmio debido a su capacidad para acumular altas cantidades de este metal en sus tejidos (Redondo-Gómez *et al.*, 2010; DalCorso *et al.*, 2010).

Otro de los mecanismos de fitorremediación de suelo con la halófito *A. macrostachyum* es aprovechando su simbiosis con las rizobacterias autóctonas que se extraen de sus raíces. Las rizobacterias son microorganismos que colonizan la rizosfera, la zona del suelo que rodea las raíces de las plantas y tienen una relación simbiótica con las mismas, ya que pueden ayudar en la absorción de nutrientes y en la defensa contra patógenos. Además, las bacterias de raíz también pueden promover la fitorremediación de suelos contaminados mediante la estimulación del crecimiento de las raíces y la degradación de los contaminantes. Las rizobacterias son organismos que han demostrado ayudar a las plantas halófitas a sobrevivir en medios contaminados con metales pesados. Un estudio logró aislar 33 bacterias de las raíces de *A. macrostachyum* y se comprobó que algunas eran más resistentes que otras a la presencia de metales pesados. Entre las rizobacterias resistentes, se incluyeron las especies de *Pseudomonas* y *Bacillus*. Los microorganismos exhiben diversas respuestas frente a los iones metálicos, incluyendo la capacidad de absorber los metales, precipitarlos y transformarlos mediante reacciones enzimáticas. Además, las bacterias de raíz pueden estimular la producción de fitohormonas y otros compuestos que promueven el crecimiento de las raíces y la absorción de nutrientes, desempeñando un papel

fundamental al colaborar en la mitigación del estrés provocado por los metales pesados en las plantas (Youghly *et al.*, 2020; De La Torre, 2017).

Estos organismos resistentes suelen ser bacilos cortos Gram negativos. Las cantidades de metales absorbidos por estas bacterias varían según la temperatura, pH, tipo de metal y tiempo de contacto con el suelo, pudiéndose resaltar las bacterias *Bacillus lentus*, *Providencia retgeri* y *Raoultella ornithinolytica*, con acumulaciones de cadmio superiores al 10% del peso total bacteriano (De La Torre, 2017; Youghly *et al.*, 2020).

De manera similar a lo observado con la capacidad de acumulación de metales, se encontró que *Bacillus lentus* fue la bacteria más efectiva en cuanto a la capacidad de absorción del metal pesado, presentando una capacidad promedio de 32,8 mg g⁻¹. Por su parte, *Providencia retgeri* ocupó el segundo lugar con una capacidad de absorción de 22,7 mg g⁻¹. En contraste, *Bacillus circulans* mostró el nivel más bajo de absorción de cromo, con un valor de 0,8 mg g⁻¹ (Youghly *et al.*, 2020).

Esta técnica puede ser una alternativa sostenible y de bajo costo para la remediación de suelos, reduciendo la necesidad de métodos costosos y agresivos. Sin embargo, se necesitan más investigaciones para determinar los mecanismos precisos detrás de esta asociación simbiótica y para optimizar el proceso de fitorremediación con bacterias de raíz de *A. macrostachyum* (Gamalero *et al.*, 2020; Youghly *et al.*, 2020).

Arthrocaulon macrostachyum en agricultura salina

Existen estudios que respaldan la efectividad del crecimiento de *A. macrostachyum* en suelos con fertilizantes nitrogenados. Estos estudios han encontrado que en suelos con bajo contenido salino, la planta muestra una menor acumulación de biomasa. Por otro lado, en cultivos con bajo contenido de nitrógeno, pero alto contenido de sal, se ha observado que la planta exhibe mayores concentraciones de agua,

mientras que el contenido proteico se mantiene constante. Estos resultados sugieren que *A. macrostachyum* puede adaptarse a condiciones de estrés salino manteniendo su contenido de agua, lo cual podría ser beneficioso en ciertos contextos de cultivo (Sisay *et al.*, 2022).

Entre las técnicas utilizadas para la desalinización de suelos con *A. macrostachyum* está el intercropping, o sistema de cultivo intercalado. Es una práctica agrícola en la que se cultivan dos o más especies de cultivo en el mismo campo al mismo tiempo, la interacción entre especies otorga a los cultivos ventajas competitivas en nutrientes y de niveles de rendimiento mayores a las que no realizan esta práctica. Se ha visto que los patrones de cultivo intercalado involucran comunicación rizosférica, donde los exudados de las raíces entregan nutrientes al suelo que la otra especie necesita (Huss *et al.*, 2022).

El uso de plantas no halófitas en suelos salinos puede aumentar la biodisponibilidad de nutrientes en el suelo mediante sus exudados, beneficiando a las halófitas como *A. macrostachyum* presentes para brindarles los nutrientes necesarios, mientras esta halófitas absorbe el sodio en exceso que puede encontrarse en el suelo. La eliminación de sal del suelo mejora la productividad del mismo. Cuando se encuentra bajo estrés salino, *A. macrostachyum* secreta a través de sus raíces exudados que se asocian con la adaptación a las condiciones de salinidad del suelo y mejora de la biodisponibilidad de nutrientes en el suelo junto con la actividad microbiana. En respuesta, las plantas no halófitas se pueden desarrollar de forma adecuada en un entorno donde ha formado una relación de simbiosis con una halófitas que se encarga de disminuir la salinidad del suelo (Wang *et al.*, 2022).

4. CONCLUSIONES

- La presente exposición ha abordado de manera exhaustiva los diversos usos de la planta halófito *A. macrostachyum*. Mediante un análisis detallado de la literatura científica y las investigaciones pertinentes, se ha evidenciado que esta especie presenta una amplia gama de aplicaciones en diferentes campos, lo cual destaca su potencial como recurso natural valioso.
- *A. macrostachyum* contiene compuestos bioactivos, como flavonoides, terpenoides y polifenoles, que exhiben propiedades antioxidantes, antiinflamatorias y anticancerígenas. Además, se ha observado que esta halófito es una fuente rica en nutrientes esenciales, como vitaminas, minerales y fibra dietética, lo que agrega valor nutricional a los productos en los que se incorpora.
- Según la bibliografía analizada para esta revisión, los extractos y los compuestos aislados de *A. macrostachyum* exhiben actividad inhibidora contra una variedad de patógenos, incluso mostrando mejores resultados que los fármacos comúnmente utilizados para su tratamiento. Varios de estos compuestos bioactivos han demostrado su capacidad para interferir con los mecanismos de crecimiento, replicación y adhesión de los microorganismos patógenos, lo que sugiere su potencial como agentes terapéuticos.
- Según la bibliografía consultada, *A. macrostachyum* ha demostrado ser una especie prometedora para la fitorremediación de suelos salinos. Su capacidad de tolerar altas concentraciones de sal, acumular iones salinos y mejorar las condiciones del suelo la convierten en una opción viable y sostenible para la rehabilitación de áreas afectadas por la salinidad.
- La bibliografía revisada indica que *A. macrostachyum* tiene una alta capacidad de tolerancia y acumulación de metales pesados en sus tejidos, lo que la convierte en una candidata adecuada para la fitorremediación. Se ha observado que esta planta es capaz de absorber, transportar y almacenar eficientemente una variedad de metales

pesados, como plomo, cadmio y cobre, reduciendo así su disponibilidad en el suelo y mitigando los efectos adversos en el medio ambiente.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- a. Accogli, R., Tomaselli, V., Direnzo, P., Perrino, E. V., Albanese, G., Urbano, M., & Laghetti, G. (2023). Edible Halophytes and Halo-Tolerant Species in Apulia Region (Southeastern Italy): Biogeography, Traditional Food Use and Potential Sustainable Crops. *Plants*, 12(3), 549. <https://doi.org/10.3390/plants12030549>
- b. Ahmadi, F., Mohammadkhani, N., & Servati, M. (2022). Halophytes play important role in phytoremediation of salt-affected soils in the bed of Urmia Lake, Iran. *Scientific Reports*, 12(1), 1-13. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-16266-4>
- c. Alvidrez-Morales, A., González-Martínez, B. E., & Jiménez-Salas, Z. (s. f.). *TENDENCIAS EN LA PRODUCCIÓN DE ALIMENTOS: ALIMENTOS FUNCIONALES*. 6.
- d. Aziz, I., & Mujeeb, A. (2022). Halophytes for phytoremediation of hazardous metal(loid)s: A terse review on metal tolerance, bio-indication and hyperaccumulation. *Journal of Hazardous Materials*, 424, 127309. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127309>
- e. Chang, Y.-T., Chung, M.-C., Hsieh, C.-C., Shieh, J.-J., & Wu, M.-J. (2021). Evaluation of the Therapeutic Effects of Protocatechuic Aldehyde in Diabetic Nephropathy. *Toxins*, 13(8), 560. <https://doi.org/10.3390/toxins13080560>
- f. Chekroun-Bechlaghem, N., Belyagoubi-Benhammou, N., Belyagoubi, L., Gismondi, A., Nanni, V., Di Marco, G., Canuti, L., Canini, A., El Haci, I. A., & Atik Bekkara, F. (2019). Phytochemical analysis and antioxidant activity of *Tamarix africana*, *Arthrocnemum macrostachyum* and *Suaeda fruticosa*, three halophyte species from Algeria. *Plant Biosystems*, 153(6), 843-852. <https://doi.org/10.1080/11263504.2018.1555191>

- g. DalCorso, G., Farinati, S., & Furini, A. (2010). Regulatory networks of cadmium stress in plants. *Plant Signaling & Behavior*, 5(6), 663-0667.
- h. Delgadillo-López, A. E., González-Ramírez, C. A., Prieto-García, F., Villagómez-Ibarra, J. R., & Acevedo-Sandoval, O. (2011). Fitorremediación: Una alternativa para eliminar la contaminación. *Tropical and subtropical agroecosystems*, 14(2), 597-612.
- i. Diamanti-Kandarakis, E., & Dunaif, A. (2012). Insulin Resistance and the Polycystic Ovary Syndrome Revisited: An Update on Mechanisms and Implications. *Endocrine Reviews*, 33(6), 981-1030. <https://doi.org/10.1210/er.2011-1034>
- j. Eijaz, S., Khan, M., Mirza, A., Parveen, A., Mansuri, S., & Nadir, M. (2021). Evaluation of the antifungal, antibacterial, and anti-inflammatory activity of a halophyte plant *Arthrocnemum macrostachyum* Koch extracts. *International Journal of Endorsing Health Science Research (IJEHSR)*, 9(4), Article 4. <https://doi.org/10.29052/IJEHSR.v9.i4.2021.499-510>
- k. El-Amier, Y. A., Soufan, W., Almutairi, K. F., Zaghloul, N. S., & Abd-ElGawad, A. M. (2022). Proximate composition, bioactive compounds, and antioxidant potential of wild halophytes grown in coastal salt marsh habitats. *Molecules*, 27(1), 28-28. <https://doi.org/10.3390/molecules27010028>
- l. EINaker, N. A., Yousef, A. F., & Yousef, L. F. (2020). A review of *Arthrocnemum* (*Arthrocaulon*) *macrostachyum* chemical content and bioactivity. *Phytochemistry Reviews*, 19(6), 1427-1448. <https://doi.org/10.1007/s11101-020-09686-5>
- m. Fazary, A. E., Alfaifi, M. Y., Elbehairi, S. E. I., Amer, M. E., Nasr, M. S. M., Abuamara, T. M. M., Badr, D. A., Ju, Y.-H., & Mohamed, A. F. (2021). Bioactivity Studies of Hesperidin and XAV939. *ACS Omega*, 6(30), 20042-20052. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c03080>
- n. Gamalero, E., Bona, E., Todeschini, V., & Lingua, G. (2020). Saline and Arid Soils: Impact on Bacteria, Plants, and Their Interaction. *Biology*, 9(6), 116. <https://doi.org/10.3390/biology9060116>

- o. Genchi, G., Sinicropi, M. S., Lauria, G., Carocci, A., & Catalano, A. (2020). The Effects of Cadmium Toxicity. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(11), Article 11. <https://doi.org/10.3390/ijerph17113782>
- p. Giordano, R., Saii, Z., Fredsgaard, M., Hulkko, L. S. S., Poulsen, T. B. G., Thomsen, M. E., Henneberg, N., Zucolotto, S. M., Arendt-Nielsen, L., Papenbrock, J., Thomsen, M. H., & Stensballe, A. (2021). Pharmacological Insights into Halophyte Bioactive Extract Action on Anti-Inflammatory, Pain Relief and Antibiotics-Type Mechanisms. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 26(11). <https://doi.org/10.3390/molecules26113140>
- q. Huss, C. P., Holmes, K. D., & Blubaugh, C. K. (2022). Benefits and Risks of Intercropping for Crop Resilience and Pest Management. *Journal of Economic Entomology*, 115(5), 1350-1362. <https://doi.org/10.1093/jee/toac045>
- r. Hyogo, A., Kobayashi, T., Garcia del Saz, E., & Seguchi, H. (2010). Efectos Antioxidantes del Ácido Protocatéquico, Ácido Ferúlico y el Ácido Caféico usando una Sustancia Fluorescente en los Neutrófilos Humanos. *International Journal of Morphology*, 28(3), 911-920. <https://doi.org/10.4067/S0717-95022010000300040>
- s. Li, X., Brejnrod, A. D., Ernst, M., Rykær, M., Herschend, J., Olsen, N. M. C., Dorrestein, P. C., Rensing, C., & Sørensen, S. J. (2019). Heavy metal exposure causes changes in the metabolic health-associated gut microbiome and metabolites. *Environment International*, 126, 454-467. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.02.048>
- t. Liang LiChen, Liu WeiTao, Sun YueBing, Huo XiaoHui, Li Song, & Zhou QiXing. (2017). Phytoremediation of heavy metal contaminated saline soils using halophytes: Current progress and future perspectives. *Environmental Reviews*, 25(3), 269-281. <https://doi.org/10.1139/er-2016-0063>
- u. Lutts, S., & Lefèvre, I. (2015). How can we take advantage of halophyte properties to cope with heavy metal toxicity in salt-

- affected areas? *Annals of Botany*, 115(3), 509-528.
<https://doi.org/10.1093/aob/mcu264>
- v. Nikalje, G. C., Saini, N., & Suprasanna, P. (2019). Halophytes and Heavy Metals: Interesting Partnerships. En S. Srivastava, A. K. Srivastava, & P. Suprasanna (Eds.), *Plant-Metal Interactions* (pp. 99-118). Springer International Publishing.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-20732-8_6
- w. Osman, M. S., Badawy, A. A., Osman, A. I., & Abdel Latef, A. A. H. (2021). Ameliorative Impact of an Extract of the Halophyte *Arthrocnemum macrostachyum* on Growth and Biochemical Parameters of Soybean Under Salinity Stress. *Journal of Plant Growth Regulation*, 40(3), 1245-1256.
<https://doi.org/10.1007/s00344-020-10185-2>
- x. Poznyak, A., Grechko, A. V., Poggio, P., Myasoedova, V. A., Alfieri, V., & Orekhov, A. N. (2020). The Diabetes Mellitus-Atherosclerosis Connection: The Role of Lipid and Glucose Metabolism and Chronic Inflammation. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(5), 1835. <https://doi.org/10.3390/ijms21051835>
- y. Ramasamy Santhanam, Santhanam Ramesh, & Hafiz Ansar Rasul Suleria. (2018). *Biology and Ecology of Pharmaceutical Marine Plants*. CRC Press.
- z. Ramírez, E. (1), Sánchez-Gavilán, I. (1), de la Fuente, V. (1), Rufo, L. (2), & Sánchez-Mata, D. (3). (2022). Morphology, anatomy and phylogeny of the two sister halophytic genera *Microcnemum* and *Arthrocnemum* (Salicornioideae/Amaranthaceae). *Plant Biosystems*, 156(6), 1422-1437. <https://doi.org/10.1080/11263504.2022.2056649>
- aa. Saghafi, D., Delangiz, N., Lajayer, B. A., & Ghorbanpour, M. (2019). An overview on improvement of crop productivity in saline soils by halotolerant and halophilic PGPRs. *3 Biotech*, 9(7), 261.
<https://doi.org/10.1007/s13205-019-1799-0>
- bb. Sánchez-Gavilán, I., Ramírez Chueca, E., & de la Fuente García, V. (2021). Bioactive Compounds in *Sarcocornia* and *Arthrocnemum*, Two Wild Halophilic Genera from the Iberian

- Peninsula. *Plants (Basel, Switzerland)*, 10(10), 2218.
<https://doi.org/10.3390/plants10102218>
- cc. Shaari, N. E. M., Tajudin, M. T. F. M., Khandaker, M. M., Majrashi, A., Alenazi, M. M., Abdullahi, U. A., & Mohd, K. S. (2022). Cadmium toxicity symptoms and uptake mechanism in plants: A review. *Brazilian Journal of Biology*, 84, e252143.
<https://doi.org/10.1590/1519-6984.252143>
- dd. Wackernagel, M. (2001). *Nuestra huella ecológica: Reduciendo el impacto humano sobre la Tierra*. Lom Ediciones.
- ee. Xiao, M., Liu, G., Jiang, S., Guan, X., Chen, J., Yao, R., & Wang, X. (2022). Bio-Organic Fertilizer Combined with Different Amendments Improves Nutrient Enhancement and Salt Leaching in Saline Soil: A Soil Column Experiment. *Water (20734441)*, 14(24), 4084. <https://doi.org/10.3390/w14244084>
- ff. Youghly, N. A. 1, Taher, H. S. 2, Youssef, H. H. 3, Fayez, M., EL-Bana, M. I. 1, ELbous, M. M. 1, & Hegazi, N. A. 3. (2020). Bioaccumulation of Chromium by Autochthonous Bacteria Associated With The Heavy Metal- Resistant Halophyte *Arthrocnemum macrostachyum*. *Egyptian Journal of Microbiology*, 55, 15-26. <https://doi.org/10.21608/ejm.2020.19136.1125>
- gg. Yuan, F., Guo, J., Shabala, S., & Wang, B. (2019). Reproductive Physiology of Halophytes: Current Standing. *Frontiers in Plant Science*, 9. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2018.01954>
- hh. Zhang, T., Tang, Q., Pu, C., & Yan, Y. (2022). Simulation on Evaporation and Motion of Atomized Droplets in Spray Dry Flue Gas Desulfurization Tower. *Journal of Thermal Science*, 31(6), 2252-2263. <https://doi.org/10.1007/s11630-022-1612-y>