



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MEXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE SINALOA DE LEYVA

TITULACION INTEGRAL CON EL PRODUCTO

TESIS

**FITORREMEDIACION DE SUELOS AGRICOLAS SALINOS CON SESUVIUM
PORTULACASTRUM EN NORTE DE SINALOA**

PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERIA EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS

PRESENTA

DANIA JOHANA HIGUERA QUINTERO (211220001)

DIRECTORA

M.C. MAÑÓN RIOS EDNA NATHALIE

CODIRECTORA

DRA. GOMEZ PERAZA ROSA LUZ

CIIDIR IPN UNIDAD SINALOA

Guasave Sinaloa, 04 de Marzo de 2026

AGRADECIMIENTOS

Este día se ve reflejada la culminación de mi etapa universitaria.

Este logro es posible gracias **a mis padres**, quienes fueron mis mayores promotores durante todo este proceso. Les agradezco sus consejos, por guiarme y por enseñarme a no rendirme ante las adversidades.

Agradezco a todas las personas que me dieron el impulso para finalizar mi proyecto educativo. Sin duda, sus valiosos aportes fueron indispensables para concretar este trabajo, el cual entrego hoy con la seguridad de que será de utilidad. Mi agradecimiento especial es para

M.C. Edna Nathalie Mañón Ríos y Dra. Rosa Luz Gómez Peraza.

Agradezco al **CIIDIR IPN UNIDAD SINALOA** por darme la oportunidad de trabajar en el proyecto SIP20250827: Fitorremediación de suelos agrícolas salinos con *sesuvium portulacastrum* en Norte de Sinaloa, financiado por la secretaria de investigación y posgrado del IPN.

DEDICATORIA

Esta tesis va dedicada a Dios quien supo guiarme por el buen camino, darme fuerzas para salir adelante.

A MIS PADRES: **Johana Leticia Quintero Rodríguez, Irán Daniel Higuera Algandar.**

Que me han conducido con amor y paciencia. Gracias por enseñarme lo que han recogido a su paso por la vida, por darme la libertad de elegir mi futuro, por brindarme con las manos abiertas apoyo y confianza en mi preparación, por compartir mis horas grises, mis momentos felices, ambiciones sueños e inquietudes. Gracias por ayudarme a salir adelante en la adversidad, por hacer de mi lo que hoy soy. Los amos.

GLOSARIO

Sesuvium portulacastrum

También conocida como verdolaga de playa, es una especie de planta suculenta perteneciente a la familia de las aizoáceas. Es una hierba perennifolia que se expande en las zonas costeras a lo largo de gran parte del mundo.

Fitorremediación

Es una ecotecnología sostenible que utiliza plantas y sus microorganismos asociados para eliminar, degradar, inmovilizar o volatizar contaminantes orgánicos e inorgánicos de suelos, agua y aire.

Salinidad

Es la concentración de sales minerales disueltas (principalmente cloruro de sodio) en aguas o suelos.

Halófila

Son organismos, principalmente microorganismos como arqueas y bacterias, que prosperan en ambientes con concentraciones extremadamente altas de la sal, como el mar muerto o salinas.

Suelos agrícolas

Es la capa superior de la tierra, rica en material orgánica, minerales, agua, aire y microorganismos.

Osmótica

Es la fuerza necesaria para detener flujos de disolvente (generalmente agua) a través de una membrana semipermeable desde una solución diluida a una más concentrada

Eichhornia crassipes

Conocido comunmente como lirio acuático, Jacinto de agua camalote.

Hydrocotyle umbellata

Conocidas como paraguas de agua, es una planta perenne que crece en humedales.

Lemna minor

Comúnmente llamada lenteja de agua, es una planta acuática flotante pequeña y simple.

ABREVIATURAS

	Abreviatura	Significado
1.	ml	Mililitros
2.	L	Litros
3.	Cm	Centímetros
4.	et al	Entre otros
5.	OD	Oxígeno disuelto
6.	°C	Grados centígrados
7.	Ps	Peso seco
8.	Pf	Peso fresco
9.	mg/LT	Miligramos x litro

RESUMEN

Este proyecto de investigación busca reducir la concentración de sales en el suelo agrícola para restaurar su fertilidad y productividad. Debido que la salinidad de suelos es un factor limitante para el desarrollo óptimo de los cultivos, encontrándose con mayor presencia en zonas áridas y semiáridas con escasas precipitaciones y abundancia de sales solubles, aunado a las malas prácticas agrícolas y las irrigaciones en los cultivos traen como consecuencia la salinización de suelos, limitando la productividad de los cultivos.

En México se ha incrementado el uso de diferentes técnicas sustentables que ayudan remediar suelos con presencia de concentraciones tóxicas en diferentes niveles tróficos, siendo una la fitorremediación, que potencialmente involucra menos costos, no solo para reducir o remover diversos nutrientes sino para degradar, transformar o inmovilizar diversos contaminantes ambientales. Se ha reportado que las plantas halófitas de nutrientes y metales pesados. *Sesuvium portulacastrum* es una planta halófila facultativa con potencial en fitorremediación y biodegradación, es candidata para la fitoextracción y fitoestabilización, esta planta es conocida por su facilidad adaptación a condiciones externas de salinidad, permitiendo su uso como alternativa ecológica y de bajo costo para la recuperación de tierras afectadas por este problema.

El objetivo principal es evaluar la capacidad fitorremediadora de *Sesuvium portulacastrum* en suelos agrícolas en norte Sinaloa, es pertinente porque aborda un problema real de salinización y potencial contaminación en suelos agrícolas de Sinaloa, usando una solución innovadora y ecológica (fitorremediación) con una especie vegetal prometedora *sesuvium portulacastrum* que ya ha demostrado su efectividad contra las sales y metales pesados en otros estudios.

Abstract

This research project seeks to reduce the concentration of salts in agricultural soil to restore its fertility and productivity. Since soil salinity is a limiting factor for the optimal development of crops, being more prevalent in arid and semi-arid areas with scarce rainfall and an abundance of soluble salts, coupled with poor agricultural practices and irrigation in crops, it results in soil salinization, limiting crop productivity. In Mexico, the use of different sustainable techniques that help remediate soils with the presence of toxic concentrations at different trophic levels has increased, one being phytoremediation, which potentially involves lower costs, not only to reduce or remove various nutrients but also to degrade, transform, or immobilize various environmental contaminants. It has been reported that halophytic plants absorb nutrients and heavy metals. *Sesuvium Portulacastrum* is a facultative halophytic plant with potential in phytoremediation and biodegradation; it is a candidate for phytoextraction and phytostabilization. This plant is known for its easy adaptation to external salinity conditions, allowing its use as an ecological and low-cost alternative for the recovery of lands affected by this problem. The main objective is to evaluate the phytoremediation capacity of *Sesuvium portulacastrum* in agricultural soils in northern Sinaloa. This is pertinent because it addresses a real problem of salinization and potential contamination in the agricultural soils of Sinaloa, using an innovative and ecological solution (phytoremediation) with a promising plant species, *Sesuvium portulacastrum*, which has already demonstrated its effectiveness against salts and heavy metals in other studies.

INDICE

I.	INTRODUCCIÓN.....	1
II.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
III.	OBJETIVOS	3
	3.1. Objetivo General	3
	3.2. Objetivos Específicos	3
IV.	JUSTIFICACIÓN.....	4
V.	MARCO TEORICO.....	5
	7.1 Salinidad de Suelos	5
	7.3. Mecanismos de tolerancia	6
	7.4. Estrategias de manejo de suelos salinos	7
	7.5. Fitorremediación	8
	7.5.1. Ventajas de la Fitorremediación de Suelos	10
	7.6. <i>Sesuvium portulacastrum</i>	11
	7.6.1. Importancia ecológica y factores de crecimiento de <i>Sesuvium portulacastrum</i> (L.).....	13
	7.6.2. Distribución geográfica de <i>Sesuvium portulacastrum</i> (L.)	14
VI.	METODOLOGÍA.....	16
	8.1. Área de estudio	16
	8.2. Colecta y multiplicación de <i>Sesuvium portulacastrum</i>	17
	8.3. Análisis nutrimental de cationes K, Ca, Mg, Na, Fe, Zn, Cu y Mn.	17
	8.4. Diseño experimental.....	18
	8.5. Análisis de datos.....	18
VII.	RESULTADOS.....	19
	9.1. Determinar la eficiencia fitorremediadora de <i>sesuvium portulacastrum</i> en la absorción de sales en suelos agrícolas.	22
VIII.	DISCUSIONES	29
IX.	CONCLUSIONES.....	33
X.	RECOMENDACIONES.....	35
XI.	FUENTES DE INFORMACIÓN	36

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Planta de Sesuvium Portulacastrum.....	12
Figura 2. Ubicación de Planta Sesuvium Portulacastrum en la República Mexicana.	14
Figura 3. Ubicación del Suelo Guamuchilito	16
Figura 4. Ubicación del Suelo Lunar y Boca del Río.....	16
Figura 5. a) Suelo Agrícola y b) Planta de Sesuvium	17
Figura 6. Fotografía de Planta Sesuvium en los 3 Tipos de Suelo 1,2,3.	21
Figura 7. Altura de Sesuvium Portulacastrum en Diferentes Suelos	24
Figura 8. Comparación de Plantas	24



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Descripción botánica de <i>Sesuvium Portulacastrum</i>	12
Tabla 2. Altura de Planta <i>Sesuvium</i> en suelo 1,2,3.....	20
Tabla 3. Análisis de suelo <i>sesuvium portulacastrum</i>	25
Tabla 4. Análisis del suelo Guamuchilito.....	26
Tabla 5. Análisis del suelo lunar salado.....	27
Tabla 6. Análisis de suelo boca del río.....	28

I. INTRODUCCIÓN

La fitorremediación es basada en la capacidad de algunas plantas para tolerar, absorber, acumular y degradar compuestos contaminantes, en la actualidad está haciendo aplicada en diversos países para recuperar suelos contaminados con compuestos orgánicos e inorgánicos. La importancia de las plantas en la fitorremediación radica en su capacidad natural para limpiar suelos y aguas contaminadas (metales pesados hidrocarburos, pesticidas) mediante procesos como la Fitoextracción (absorción y acumulación), Fitodegradación (descomposición de orgánicos), Rizofiltración (absorción por raíces), Fitoestabilización (inmovilización de contaminantes) y Fitovolatilización (liberación de formas menos tóxicas a la atmósfera). Estos métodos son ecológicos, económicos, restauran la biodiversidad y son una alternativa sostenible a la remediación tradicional mejorando la productividad de la tierra y la salud del ecosistema. También tenemos las halófitas que absorben la salinidad de los suelos y una de las halófitas es *Sesuvium portulacastrum*, también conocida como verdolaga de playa tiene la capacidad de limpiar suelos salinos ya que contiene alto potencial fitorremediador que tiene compuestos o metabolitos secundarios de gran valor para la industria farmacéutica lo que hace una planta prometedora para fitorremediar los efluentes camaronícolas de manera sustentable. Guasave, Sinaloa enfrenta el desafío de la salinidad en sus suelos, pero gestiona activamente para mantener su alta producción agrícola, con un factor clave para su economía local, muy ligada a la agroindustria del tomate y otros cultivos de alto valor. Por lo tanto, esta investigación tiene la finalidad de poner a prueba tres tipos de suelos, con diferentes conductividades eléctricas, que impacta la agricultura, pero se maneja con técnicas como la fertirrigación para mejorar la productividad de cultivos como el tomate, aprovechando también la zona costera con vegetación halófila.

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El municipio de Guasave enfrenta grandes retos derivados de la alta salinidad de sus suelos. Esta condición afecta varias extensiones de terreno que podrían ser aprovechadas, abarcando desde suelos agrícolas convencionales y salinos hasta zonas con características costeras o de salinidad moderada.

Esta problemática limita severamente el desarrollo económico, ya que la salinidad provoca el bajo rendimiento de los cultivos. Por lo tanto, los principales desafíos de manejo para la región son: mitigar la salinidad mediante una gestión eficiente del agua e implementar un adecuado manejo agronómico adaptado a los cultivos y cosechas producidas en estos suelos.

La alta salinidad del suelo es un problema conocido y documentado en el municipio de Guasave, Sinaloa, que afecta a miles de hectáreas agrícolas y representan un reto significativo para la producción de alimentos en la región. Mientras que la Gestión del agua juega un papel importante debido a que se enfoca en la implementación de prácticas específicas de manejo afectadas. del drenaje y el uso de enmiendas para la rehabilitación de las tierras agrícolas. Por su parte un papel importante lo tiene en este tema el manejo agronómico y de cosecha, ya que se centra en la gestión eficiente del riego y drenaje, la selección de cultivos tolerantes y el uso de enmiendas químicas y orgánicas para mitigar la acumulación de sales. El manejo agronómico, las practicas agronómicas debe orientarse a reducir la concentración de sales en la zona radicular del cultivo como, por ejemplo., análisis y monitoreo de suelo, riego eficiente, drenaje, enmiendas de suelo y selección de cultivos tolerantes. El manejo de cosecha no mitiga directamente la salinidad del suelo, pero ayuda a maximizar el rendimiento y la calidad del cultivo restante a pesar del estrés salino, como, por ejemplo., monitoreo del desarrollo del cultivo, cosecha oportuna y consideración de calidad.

III. OBJETIVOS

3.1. Objetivo General

Evaluar la capacidad fitorremediadora de *Sesuvium portulacastrum* en suelos agrícolas en norte Sinaloa

3.2. Objetivos Específicos

- Evaluar el crecimiento vegetativo de *Sesuvium portulacastrum* en los diferentes tipos de suelos.
- Determinar la eficiencia fitorremediadora de *Sesuvium portulacastrum* en la absorción de sales en suelos agrícolas.
- Analizar la eficiencia fitorremediadora de *Sesuvium portulacastrum* en la acumulación de sales en suelos agrícolas.

IV. JUSTIFICACIÓN

La presencia de excesos de sales en los suelos agrícolas constituye uno de los desafíos más severos que afectan la productividad del sector en el Norte de Sinaloa. Esta región, depende fuertemente de la agricultura de riego intensivo, experimenta una acumulación progresiva de sales solubles (principalmente cloruros y sulfatos de sodio) en la zona radicular de los cultivos, lo cual desencadena consecuencias críticas. Salma, I., et al. (2015).

Reducción del rendimiento agrícola afectando la economía de la región, por la alta presión osmótica del suelo generada por las sales impide la absorción efectiva de agua y nutrientes por parte de las plantas, lo que se traduce en un estrés hídrico y nutricional, afectando directamente su crecimiento y el rendimiento final de las cosechas.

Degradación de la Calidad del Suelo: La acumulación salina disminuye la fertilidad, altera la estructura física del suelo e incrementa los riesgos de desertificación, haciéndolo menos apto para una agricultura sostenible a largo plazo.

Compromiso Socioeconómico: La pérdida recurrente de cosechas impacta directamente en la rentabilidad de los productores, desestabilizando la economía local y la cadena de valor agrícola regional.

V. MARCO TEORICO

7.1 Salinidad de Suelos

La salinidad del suelo es un fenómeno ambiental de gran relevancia que afecta a millones de hectáreas de tierras agrícolas a nivel mundial. Este fenómeno tiene efectos perjudiciales sobre la productividad agrícola, la biodiversidad de los ecosistemas y la calidad del agua, lo que convierte en un desafío crítico para la agricultura, especialmente en áreas áridas y semiáridas. La salinidad puede ser provocada tanto por procesos naturales como de actividades humanas, tales como el riego inadecuado, el uso excesivo de fertilizantes y la acumulación de sales solubles derivadas de la evaporación (Munns, 2005).

La salinidad se refiere a la acumulación de sales solubles en el perfil del suelo, que afecta el crecimiento de las plantas. Las sales comunes en suelos salinos incluyen cloruros, sulfatos, carbonatos y bicarbonatos de sodio, calcio, magnesio y potasio. La concentración de estas sales es un factor determinante para el impacto que tiene sobre las plantas, ya que las altas concentraciones elevadas pueden inducir toxicidad iónica y estrés osmótico. Las causas de la salinidad son diversas, pero se pueden clasificar en dos categorías principales:

Condiciones climáticas las regiones áridas y semiáridas

Donde las precipitaciones son bajas y la evaporación es alta, son más propensas a la acumulación de sales. La presencia de minerales solubles en las capas subyacentes del suelo puede liberar sales de manera gradual a través de procesos geológicos naturales (Rodríguez et al., 2013).

7.2. Causas antrópicas.

Uso de agua de riego salina: El riego con agua de mala calidad o con alto contenido de sales es una causa directa de salinización. La evaporación del agua de riego deja las sales en la superficie del suelo, lo que resulta en un aumento de la salinidad. Manejo inadecuado de suelos agrícolas: El uso excesivo de fertilizantes nitrogenados, el drenaje insuficiente y las prácticas agrícolas inapropiadas pueden agravar la salinidad en suelos agrícolas (Munns, 2005).

7.3. Mecanismos de tolerancia

La salinidad del suelo afecta a las plantas a través de dos mecanismos principales:

Estrés osmótico: Las altas concentraciones de sales en el suelo generan un gradiente osmótico que impide la absorción de agua por las raíces de las plantas. Este fenómeno provoca deshidratación, lo que interfiere con el proceso de fotosíntesis y otras funciones metabólicas esenciales. Los síntomas de estrés osmótico incluyen hojas marchitas, reducción del crecimiento y amarilleo (chlorosis) de las hojas (Chaves et al., 2003).

Toxicidad iónica:

Las sales solubles, especialmente los iones de sodio (Na^+) y cloruro (Cl^-), pueden acumularse en las células vegetales y alterar su funcionamiento. En concentraciones altas, estos iones son tóxicos y pueden inhibir la actividad enzimática, el transporte de nutrientes y la síntesis de proteínas, lo que reduce la capacidad de las plantas para crecer y desarrollarse de manera saludable (Munns y Tester, 2008).

Mecanismos de Tolerancia a la Salinidad en las Plantas:

Las plantas que crecen en suelos salinos han desarrollado una variedad de estrategias de adaptación y mecanismos de tolerancia a la salinidad. Estos mecanismos se pueden dividir en tres categorías principales: Mecanismos de exclusión de sal: Algunas plantas tienen la capacidad de prevenir la absorción de iones salinos a través de sus raíces, limitando así la acumulación de sales en los tejidos vegetales. Este proceso puede involucrar el uso de barreras selectivas en las membranas celulares de las raíces que excluyen activamente los iones tóxicos del suelo (Shabala et al., 2014). Mecanismos de compartimentalización de sal:

Las plantas halófitas, como el *Sesuvium portulacastrum*, acumulan sales en vacuolas de sus células, reduciendo la concentración de iones tóxicos en el citoplasma.

Este mecanismo permite a las plantas manejar las altas concentraciones de sal sin comprometer su función celular normal (Hasegawa et al., 2000).

Mecanismos osmóticos: La acumulación de compuestos osmóticos, como la prolina, la glicina-betaína y otros osmolitos compatibles, ayuda a las plantas a mantener el equilibrio hídrico y proteger las células de la deshidratación. Estos compuestos permiten que las plantas mantengan turgencia celular, a pesar del estrés osmótico inducido por la salinidad (Zhu, 2002).

Manejo y Mitigación de la Salinidad del Suelo

7.4. Estrategias de manejo de suelos salinos

El manejo de la salinidad del suelo es fundamental para preservar la productividad agrícola y los ecosistemas naturales. Algunas estrategias clave incluyen: Mejoras en el manejo del riego: El uso de agua de riego de buena calidad y la implementación de prácticas de riego eficientes (como el riego por goteo) pueden reducir la acumulación de sales en el suelo. Además, el uso de drenaje adecuado es esencial para evitar la salinización secundaria (Rhoades, 1997). Uso de plantas tolerantes a la salinidad: La investigación sobre cultivos tolerantes a la salinidad ha permitido identificar especies y variedades que pueden prosperar en suelos salinos.

Estas plantas son cruciales para la recuperación de tierras agrícolas degradadas y para el diseño de sistemas agroecológicos sostenibles en áreas salinas (Flowers y Colmer, 2008). Enmiendas del suelo: La adición de enmiendas orgánicas, como el compost o el estiércol, puede mejorar la estructura del suelo, aumentando su capacidad de retención de agua y reduciendo la toxicidad iónica.

También se han probado enmiendas con yeso y otros productos minerales para mejorar el drenaje y disminuir la salinidad del suelo (Qadir et al., 2007). Manejo de cultivos y prácticas agronómicas: La rotación de cultivos, la implementación de cultivos de cobertura y la utilización de técnicas como el acolchado pueden ayudar a reducir la acumulación de sales y a mejorar la salud general del suelo (Shannon et al., 2014).

7.5. Fitorremediación

La fitorremediación es una tecnología emergente de biorremediación que utiliza plantas y sus procesos fisiológicos, bioquímicos y microbiológicos asociados para reducir, estabilizar o eliminar contaminantes presentes en suelos, aguas y sedimentos. Esta técnica ha cobrado creciente interés en las últimas décadas por ser una alternativa ecológica, económica y sostenible frente a los métodos físico-químicos convencionales, especialmente en regiones tropicales, donde las condiciones ambientales favorecen el desarrollo vegetal continuo (González-Alcaraz et al., 2022).

En zonas tropicales, factores como temperaturas constantes, alta radiación solar, precipitaciones estacionales y diversidad florística nativa crean un entorno favorable para el establecimiento de especies vegetales con alta producción de biomasa.

Esta característica es esencial en la fitorremediación, dado que permite una mayor capacidad de extracción, estabilización o transformación de contaminantes (Reeves & Baker, 2000; Guerra Sierra et al., 2021). No obstante, para lograr una aplicación efectiva, es indispensable seleccionar especies con adaptaciones morfofisiológicas que les permitan sobrevivir y crecer en condiciones de estrés por contaminación.

Los criterios más comúnmente considerados para la selección de plantas fitorremediadora incluyen: tasa de crecimiento, producción de biomasa aérea y radicular, profundidad y arquitectura del sistema radical, tolerancia a contaminantes específicos, capacidad de acumulación y translocación, así como la producción de enzimas relacionadas con la degradación o transformación de compuestos tóxicos (Prasad, 2007; Vangronsveld et al., 2009). En adición, se ha destacado el papel de la evapotranspiración y las interacciones planta microorganismo como factores clave en el éxito de los procesos de remediación (Khatoon et al., 2024)

La eficiencia de la fitorremediación depende, en gran medida, del tipo y concentración del contaminante, su biodisponibilidad, así como de las propiedades fisicoquímicas del suelo (pH, textura, contenido de materia orgánica, entre otros) (Cunningham & Ow, 1996; Ali et al., 2013). Estos parámetros determinan la capacidad de las plantas para absorber, transformar o inmovilizar los contaminantes. En el caso específico de los contaminantes orgánicos, el proceso vegetal de degradación involucra generalmente tres fases principales: (i) transformación o activación del compuesto por oxidación, reducción o hidrólisis, (ii) conjugación del metabolito con moléculas endógenas como azúcares, aminoácidos o glutatión, y (iii) compartimentalización o almacenamiento del compuesto en vacuolas o incorporación en estructuras como la pared celular (Komives & Gullner, 2005; Dietz & Schnoor, 2001; Cherian & Oliveira, 2005).

Diversos estudios han demostrado el potencial fitorremediador de plantas acuáticas y terrestres frente a distintos contaminantes. Por ejemplo, *Eichhornia crassipes* redujo hasta 1530 mg/L de DQO en efluentes textiles en un periodo de siete días (Kousar et al., 2016), mientras que *Pistia stratiotes* mostró tolerancia a concentraciones de hasta 1931 mg/L de DQO (Mukherjee et al., 2015). En otro estudio, *E. crassipes* logró absorber 2121 mg/L de DBO de aguas residuales (Nuraini et al., 2015). Por su parte, *Hydrocotyle umbellata* redujo significativamente la concentración de nitrógeno amoniacal (136 mg/L), y *Lemna minor* evidenció una inhibición del 50 % del crecimiento en presencia de 7.2 mg/L de amoníaco (Wang, 1991). En ambientes salinos, *Sesuvium portulacastrum* ha demostrado tolerancia a concentraciones de hasta 1000 mM de NaCl, lo que le confiere alto potencial para fitorremediar zonas costeras afectadas por salinización (Slama et al., 2007).

A pesar de los avances, aún persisten desafíos en la transferencia de resultados de laboratorio a condiciones reales de campo. La complejidad de los ecosistemas tropicales y la interacción de múltiples factores bióticos y abióticos exigen enfoques integrales para optimizar la aplicación de esta tecnología.

Por ello, la identificación de especies nativas o adaptadas con alto potencial fitorremediador, así como la evaluación de su desempeño bajo condiciones ambientales locales, se consideran elementos clave para la implementación efectiva de la fitorremediación como estrategia de restauración ecológica y gestión ambiental en regiones tropicales.

7.5.1. Ventajas de la Fitorremediación de Suelos

La fitorremediación representa una estrategia de remediación ambiental basada en el uso de la fisiología vegetal y sus interacciones ecológicas para eliminar, estabilizar o transformar contaminantes presentes en el suelo. Esta técnica aprovecha procesos naturales como la absorción radicular, translocación, metabolismo secundario y asociaciones simbióticas con microorganismos de la fitorremediación representa una estrategia de remediación ambiental basada en el uso de la fisiología vegetal y sus interacciones ecológicas para eliminar, estabilizar o transformar contaminantes presentes en el suelo. Esta técnica aprovecha procesos naturales como la absorción radicular, translocación, metabolismo secundario y asociaciones simbióticas con microorganismos de la rizosfera para intervenir eficazmente en sitios contaminados (Ali, Khan, & Sajad, 2013).

Una de sus principales ventajas es su bajo impacto ambiental, en comparación con técnicas físico-químicas convencionales, ya que no requiere excavaciones masivas ni el uso intensivo de maquinaria o reactivos sintéticos. Además, mejora la estructura del suelo, favorece la acumulación de materia orgánica y estimula la actividad biológica en la rizosfera, lo que contribuye a la restauración ecológica del ecosistema afectado (González-Alcaraz et al., 2022). En términos de viabilidad económica, la fitorremediación es significativamente más económica que otras tecnologías, especialmente en grandes extensiones de terreno.

Su implementación en campo requiere menor inversión en infraestructura y mantenimiento, además de ofrecer la posibilidad de ser combinada con cultivos de interés comercial o energético, como los destinados a la producción de biomasa o biocombustibles (Rabêlo et al., 2022).

Desde el punto de vista biológico, otro aspecto relevante es su selectividad ecológica, ya que permite utilizar especies vegetales nativas o adaptadas a condiciones locales, lo que favorece la biodiversidad y reduce el riesgo de introducir especies invasoras.

Además, muchas de estas plantas presentan respuestas fisiológicas especializadas al estrés por contaminantes, como la producción de compuestos antioxidantes, proteínas de choque térmico y mecanismos de compartimentalización que evitan el daño celular (Vangronsveld et al., 2009).

La fitorremediación también promueve interacciones planta-microorganismo beneficiosas, que mejoran la disponibilidad de nutrientes y contaminantes para las raíces, aceleran la degradación de compuestos orgánicos y aumentan la tolerancia general de la planta. Estas asociaciones, particularmente con bacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPB) y hongos micorrízicos, son fundamentales para su éxito en condiciones de campo (Khatoon, Orozco-Mosqueda, & Santoyo, 2024).

Adicionalmente, esta tecnología permite una monitoreabilidad visual del proceso, ya que el crecimiento, salud y desarrollo de las plantas pueden servir como vindicadores del avance en la remediación, facilitando el seguimiento sin necesidad de instrumentación compleja.

7.6. *Sesuvium portulacastrum*

Sesuvium portulacastrum (L.), comúnmente conocida como verdolaga de playa, es una planta herbácea que se distribuye ampliamente en regiones tropicales y subtropicales del mundo, creciendo predominantemente en ambientes costeros salinos y suelos arenosos (Slama et al., 2007; Lokhande et al., 2013).

La descripción botánica de *sesuvium portulacastrum* pertenece al reino plante, tal como se muestra en la **tabla 1**.

Tabla 1. Descripción botánica de *sesuvium portulacastrum*

1.	Reino	Plante
2.	Subreino	Tracheophyta
3.	División	Magnoliophyta
4.	Clase	Magnoliopsida
5.	Subclase	Caryophyllidae
6.	Orden	Caryophyllales
7.	Familia	Aizoaceae
8.	Subfamilia	Sesuvioideae
9.	Genero	Sesuvium
10.	Especie	S, portulacastrum L.



Figura 1. Planta de *Sesuvium Portulacastrum*.

7.6.1. Importancia ecológica y factores de crecimiento de *Sesuvium portulacastrum* (L.)

Sesuvium portulacastrum (L.), presenta un hábito de crecimiento rastrero y succulento, con tallos extendidos que pueden alcanzar más de un metro de longitud. Las hojas son opuestas, carnosas, oblongo-lineares, de color verde brillante a púrpura en condiciones de estrés, lo que sugiere acumulación de pigmentos antioxidantes como antocianinas (Flowers & Colmer, 2008). Las flores son pequeñas, hermafroditas, solitarias o agrupadas en las axilas foliares, con cinco pétalos rosados a púrpuras, lo cual facilita su polinización entomófila. Su capacidad reproductiva es tanto sexual (a través de semillas) como asexual (por fragmentación de tallos), favoreciendo su propagación rápida en ambientes costeros (Radhakrishnan et al., 2021).

A nivel fisiológico, *S. portulacastrum* exhibe una notable tolerancia a la salinidad, sobreviviendo en concentraciones de NaCl superiores a 1000 mM sin mostrar inhibición significativa del crecimiento, lo que la clasifica como una halófita extrema (Slama et al., 2007). Esta tolerancia se debe a varios mecanismos adaptativos: acumulación de osmoprotectores como prolina y glicina betaína, eficiencia en la exclusión iónica, y compartimentalización de sales en vacuolas celulares para evitar toxicidad citoplasmática (Lokhande & Suprasanna, 2012). Adicionalmente, su sistema radical es superficial pero extensivo, lo cual le permite aprovechar la humedad de capas superficiales del suelo y facilitar la absorción de nutrientes incluso en suelos pobres.

En cuanto a su ecología, *S. portulacastrum* juega un rol clave en la estabilización de dunas y suelos costeros, ayudando a controlar la erosión y mejorar la fertilidad edáfica a través de la acumulación de materia orgánica y la promoción de comunidades microbianas beneficiosas en la rizosfera (Parida & Das, 2005). Estas propiedades la hacen especialmente valiosa en planes de restauración ecológica de zonas degradadas por salinización, derrames de hidrocarburos u otras formas de contaminación (Raja et al., 2020).

7.6.2. Distribución geográfica de *Sesuvium portulacastrum* (L.)

Sesuvium portulacastrum (L.), habita principalmente en ecosistemas costeros salinos y ambientes intermareales. Su distribución abarca regiones litorales de América, África, Asia, Oceanía y diversas islas tropicales del Pacífico e Índico, siendo considerada una de las halófitas más ampliamente dispersas a nivel mundial (Wagner et al., 1990; Flowers & Colmer, 2008).

En el continente americano, *S. portulacastrum* se encuentra desde el sur de Estados Unidos (Florida, Texas), hasta el Caribe, América Central y las costas del norte de América del Sur, incluyendo países como México, Colombia, Venezuela y Brasil. (Dassanayake & Fosberg, 1980; Duke, 2006).

En la República Mexicana se encuentra distribuida por los estados de Campeche, Chiapas, Colima, Distrito Federal, Hidalgo, Estado de México, Nayarit, Oaxaca, Quintana Roo, Sinaloa, Tabasco, Tamaulipas, Veracruz y Yucatán (Villaseñor y Espinosa, 1998).



Figura 2. Ubicación de Planta *Sesuvium Portulacastrum* en la República Mexicana.

6.4. Importancia económica

Tiene alto valor medicinal, ya que produce metabolitos secundarios útiles para sustituir algunas sustancias sintéticas (Rojas et al., 1992; Burits et al., 2001) y Chandrasekaran et al. (2011) reportaron que los ésteres metílicos de ácidos grasos (extracto de FAME) de esta planta pueden usarse en la medicina tradicional como un potencial agente antimicrobiano.

Técnicas de procedimientos de análisis de cationes utilizando principalmente en la agricultura y en la química del suelo para determinar la cantidad e identidad de iones cargados positivamente (cationes) esenciales para la nutrición de las plantas. Estos análisis son fundamental para evaluar la fertilidad del suelo optimizar los programas de fertilización. Con el propósito de;

- Evaluar la fertilidad del suelo.
- Diagnosticar deficiencias o excesos.
- Optimizar la fertilización.
- Manejar el pH del suelo.
- Predecir interacciones iónicas.

VI. METODOLOGÍA

8.1. Área de estudio

El presente estudio fue realizado en las instalaciones del Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional (CIIDIR) Unidad Guasave en el laboratorio de Agricultura protegida del departamento de Biotecnología agrícola.



Figura 3. Ubicación del Suelo Guamuchilito

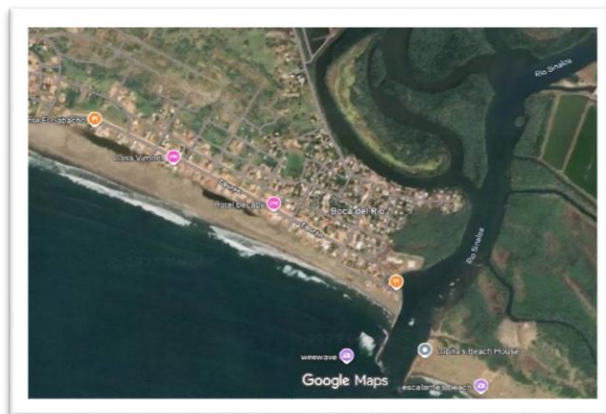


Figura 4. Ubicación del Suelo Lunar y Boca del Río

8.2. Colecta y multiplicación de *Sesuvium portulacastrum*.

La colecta de plantas *Sesuvium portulacastrum* se llevó a cabo en las zonas costeras del estado de Sinaloa, tomando como principal característica plantas totalmente sanas y libres de marchimientos. Posteriormente se aclimataron y se multiplicaron por esquejes seleccionados de la planta madre a temperatura ambiente en contenedores de unicel (1L) con suelo agrícola (Figura 7). Proceso de toma de muestra de suelo y planta

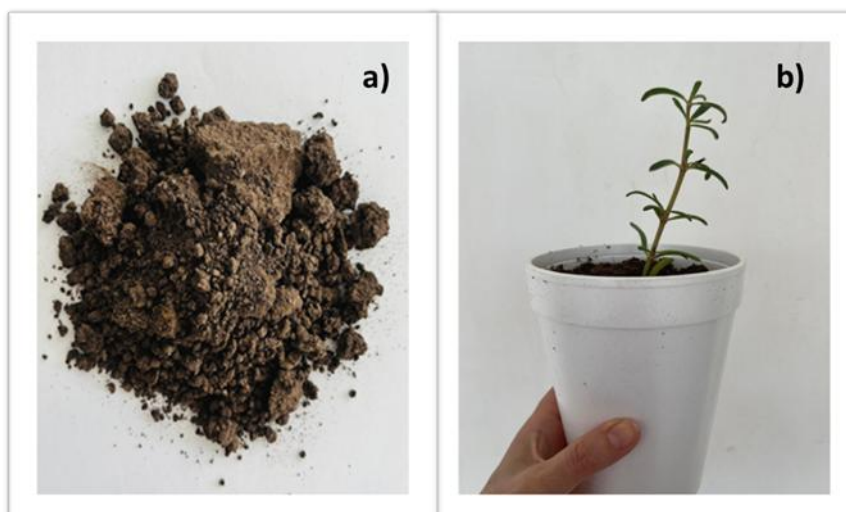


Figura 5. a) Suelo Agrícola y b) Planta de Sesuvium

8.3. Análisis nutrimental de cationes K, Ca, Mg, Na, Fe, Zn, Cu y Mn.

Método AS-12, con acetato de amonio. Se emplea una solución saturante de acetato de 1N con pH De 7 la cual se agregó a una muestra de 5 g, se agitó durante 10 minutos, se centrifugó a amonio 2500 rpm, durante 10 min y se filtró el sobrenadante en un vaso de precipitado, este paso se repite 3 veces y finalmente se aforo a 100 ml con la solución de acetato de amonio. Posteriormente se hicieron las respectivas diluciones con agua destilada para determinar la concentración de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe, Zn, Mn y Cu por espectrofotometría de absorción atómica marca Varían modelo 50B para K^{+} espectrofotometría de emisión de flama marca Buck Científico.

8.4. Diseño experimental

Con el objetivo de evaluar la capacidad fitorremediadora de *Sesuvium portulacastrum* en diferentes tipos de suelos agrícolas del norte de Sinaloa, se estableció un diseño experimental basado en esquejes uniformes de 15 cm de longitud.

Cada esqueje fue plantado en contenedores de unicel (1 L) que contenían diferentes tipos de suelo representativos de zonas agrícolas con distintos grados de salinidad:

Guamuchilito con 2 dS m^{-1} (suelo agrícola convencional)

Lunar con 4 dS m^{-1} (suelo salino)

Boca del Río con 0.65 dS m^{-1} (suelo con salinidad moderada y características costeras)

El experimento se mantuvo bajo condiciones ambientales controladas, con riego y monitoreo constante, permitiendo la evaluación comparativa del crecimiento vegetativo y la eficiencia de remoción de sales en cada tipo de suelo.

8.5. Análisis de datos

El comportamiento de las variables físico-químicas en los tratamientos, así como la capacidad de retención de nutrientes se evaluaron mediante un ANOVA mientras que las diferencias entre los tratamientos se analizaron con una prueba de comparación múltiple de medias de Tukey ($p > 0.05$), en el paquete estadístico SAS.

VII. RESULTADOS

Evaluación del crecimiento vegetativo de *Sesuvium portulacastrum* en los diferentes tipos de suelos.

El análisis de la respuesta morfométrica de la halófito facultativa *Sesuvium portulacastrum* a diferentes tipos de suelos, reveló una dependencia crítica del suelo utilizado sobre el desarrollo vegetal, reflejado en la variable altura de planta (Figura 1). La diferencia observada entre los tratamientos subraya la interacción compleja entre los factores nutricionales, salinos y texturales del suelo en el contexto de la fitorremediación.

La mayor altura de *Sesuvium portulacastrum* se registró consistentemente en el tratamiento con suelo Lunar (Figura 6). Este resultado se justifica por la rica dotación nutricional inicial del suelo (Tabla 3), estableciendo un entorno de crecimiento altamente fértil que compensó el estrés salino inicial.

La mayor altura de la planta y la acumulación vigorosa de biomasa aérea que observamos son un resultado directo tipo del suelo en este tratamiento. Esto se debe a que el suelo proporcionó todos los elementos esenciales para un crecimiento rápido y eficiente. Básicamente, el alto contenido inicial de nutrientes clave como el fósforo (P), el potasio (K) y el calcio (Ca), junto con una gran cantidad de Materia Orgánica (MO), al tener esto en abundancia, la planta pudo realizar la división celular (crear nuevas células) a una tasa muy alta, lo que es la base de la elongación del tallo.

El suelo de Guamuchilito (2 dS m^{-1}) promovió un crecimiento intermedio, caracterizado por una altura progresiva y sostenida, debido a la presencia de niveles adecuados de NO_3 y micronutrientes aseguró un metabolismo equilibrado, particularmente en la síntesis de clorofila y proteínas, elementos clave para el crecimiento vertical. La textura franco-arcillosa del suelo facilitó una óptima retención de agua y nutrientes, manteniendo la disponibilidad de recursos y minimizando el stress hídrico.

Simultáneamente, la mejora en la conductividad eléctrica confirma que, si bien las condiciones iniciales no fueron tan ricas como en el suelo Lunar

(4 dS m⁻¹), la actividad fitorremediadora de *S. portulacastrum* fue efectiva, contribuyendo a la desalinización y mejorando las condiciones para su propio crecimiento.

El suelo Boca del Río (0.65 dS m⁻¹) resultó en la menor altura promedio de planta. Esta limitación en el desarrollo, notable al ser el suelo de origen de la especie, pone de manifiesto que las propiedades son el factor limitante dominante, superando la adaptación ecológica intrínseca de la planta. El suelo se caracterizó por una escasez de nutrientes y escasa Materia Orgánica.

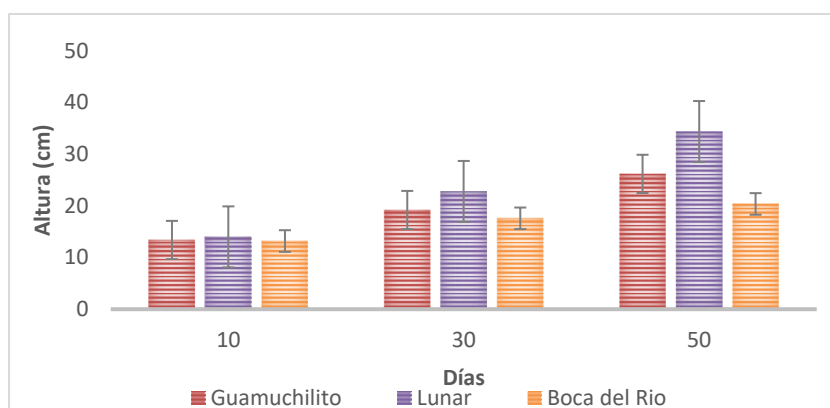


Tabla 2. Altura de planta sesuvium en suelo:1 2 3

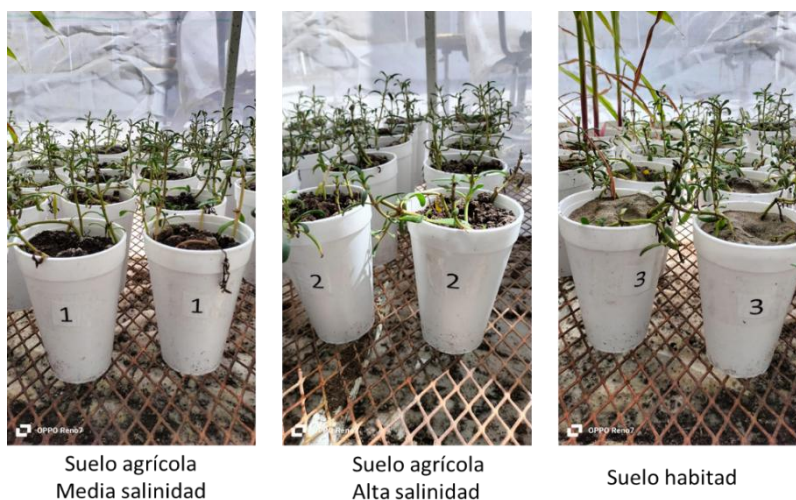


Figura 6. Fotografía de Planta Sesuvium en los 3 Tipos de Suelo 1,2,3.

Los resultados demuestran que las propiedades físicas y químicas del suelo ejercen una influencia significativa sobre el desarrollo morfológico y la capacidad de fitorremediación de la halófita *S. portulacastrum*. Específicamente, la textura del suelo se identificó como un factor limitante directo en la acumulación de biomasa aérea y, consecuentemente, en la efectividad de la remediación.

El crecimiento vertical de *S. portulacastrum* fue directamente afectado por el tipo de suelo, siendo la menor altura observada en el suelo Boca del Río 0.65 dS m^{-1} (textura arenosa) y la mayor altura en el suelo Lunar 4 dS m^{-1} (textura franco-arenosa). Este patrón sugiere que, si bien la especie es tolerante a la salinidad (halófita), el crecimiento óptimo se logra en suelos que combinan una salinidad moderada con una alta disponibilidad de nutrientes.

El suelo Boca del Río 0.65 dS m^{-1} , a pesar de ser el hábitat de origen de la especie, limitó severamente el desarrollo. Su textura arenosa resultó en una baja capacidad de retención de agua y nutrientes (Morgan y Conolly, 2013), además de una escasa Materia Orgánica.

Esta combinación de factores generó un ambiente de estrés hídrico y nutricional crónico, lo cual limitó la división y elongación celular, reflejándose en la menor altura registrada.

Por el contrario, la mayor altura en el suelo Lunar 4 dS m⁻¹ (franco-arenoso) sugiere que condiciones de salinidad inicial elevada, pero manejables, en presencia de nutrientes abundantes, pueden estimular la fisiología de la planta, promoviendo un mayor crecimiento. Este hallazgo concuerda con la literatura que indica que las halófitas pueden mostrar un crecimiento vigoroso bajo salinidad óptima.

La reducción de altura observada en el suelo arenoso bajo estrés nutricional, concuerda con estudios previos, como el de Shahba et al. (2012), donde se reportó una reducción de altura en *Paspalum vaginatum* bajo estrés salino, destacando que el crecimiento se compromete severamente cuando la salinidad no está compensada por una nutrición adecuada.

9.1. Determinar la eficiencia fitorremediadora de *sesuvium portulacastrum* en la absorción de sales en suelos agrícolas.

El tipo de suelo afectó significativamente en la capacidad de fitorremediación de *S. portulacastrum*: El suelo franco-arcilloso (como el de Guamuchilito 2 dS m⁻¹) facilitó la retención de nutrientes y agua. Esta estabilidad hídrica y nutricional aseguró una alta actividad metabólica de la planta, esencial para los mecanismos de absorción y exclusión de sales, lo que se tradujo en una eficiente fitorremediación y mejor desarrollo.

En contraste, la textura arenosa (Boca del Río 0.65 dS m⁻¹) con sus propiedades limitantes (baja retención) no solo inhibió el crecimiento, sino que también comprometió la capacidad de la planta para alterar significativamente las propiedades del suelo y fitorremediar. Esto implica que la efectividad de la fitorremediación está intrínsecamente ligada al vigor de la planta, el cual depende de las propiedades físicas del suelo.

Analizar la eficiencia fitorremediadora de *sesuvium portulacastrum* en la acumulación de sales en suelos agrícolas.

El cultivo de *Sesuvium portulacastrum* indujo cambios importantes en la salinidad y pH, confirmando su potencial como agente fitorremediador, especialmente en la reducción de salinidad.

También se observó una reducción de la Conductividad Eléctrica (CE) en todos los tipos de suelo, siendo este un indicador fiable de la disminución del contenido total de sales, tal como lo señalan Viconti y La Paz (2016). Los resultados sugieren que *S. portulacastrum* posee mecanismos activos de "fitodesalinización" (John et al., 2024), mediante la absorción y acumulación de iones salinos (principalmente Na^+ y Cl^-) en sus tejidos aéreos y la alteración de la composición iónica de la rizosfera (Ramas Amy et al., 2017). Ayyappa et al. (2016) observaron una reducción significativa de la CE y NaCl al utilizar esta especie para remediar suelos con efluentes de curtiduría.

Mamani et al. (2020) reportaron rendimientos de fitodesalinización de 23.4% para *S. portulacastrum* en suelos altamente salinos. Ravindran et al. (2007) destacaron a *S. portulacastrum* entre seis halófitas por su alta capacidad para reducir la CE de 4.9 a 2.5 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ en un periodo de 120 días.

La capacidad de *Sesuvium portulacastrum* para detener e invertir el aumento de la CE del suelo es, por lo tanto, evidente y de gran relevancia para la recuperación de suelos salinizados. El pH del suelo varió entre los tipos de sustrato, sugiriendo un efecto fitorremediador indirecto de la planta sobre la disponibilidad de nutrientes: *S. portulacastrum* tiene la capacidad de mantener el pH del suelo relativamente bajo mediante la acidificación en la rizosfera (Zhou et al., 2009). Esta acidificación se debe a la exudación de ácidos orgánicos por las raíces, lo cual tiene dos efectos benéficos:

- Mejora la disponibilidad de nutrientes al solubilizar algunos elementos que se encuentran inmovilizados.
- Promueve una mejor tolerancia a la salinidad al influir en el equilibrio iónico y la absorción de cationes esenciales.

La modificación del pH junto con la reducción de la CE confirma que el mecanismo fitorremediador de *S. portulacastrum* no es solo una simple absorción de sales, sino un proceso activo y multifacético que altera el microambiente edáfico para su propio beneficio y para la remediación general del sustrato.

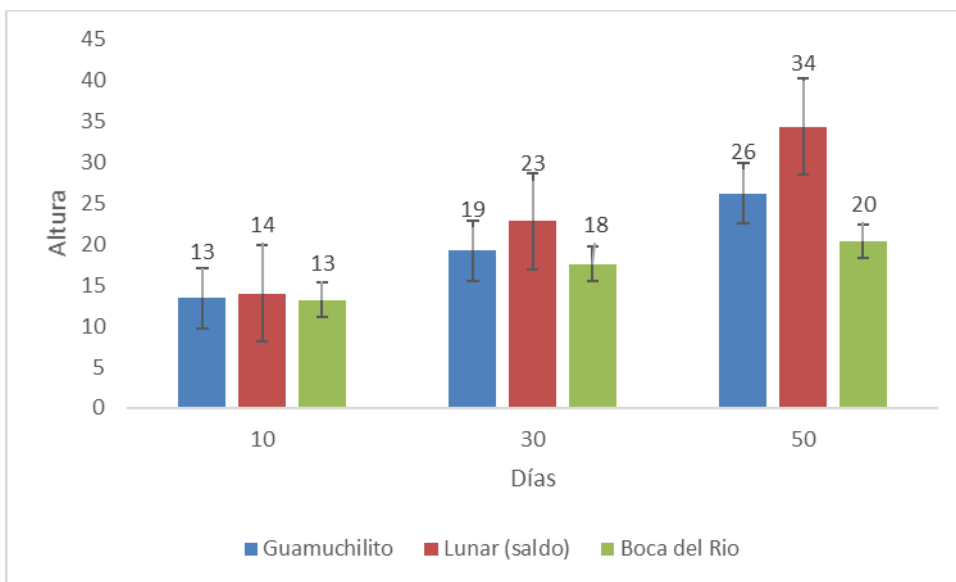


Figura 7. Altura de Sesuvium Portulacastrum en Diferentes Suelos

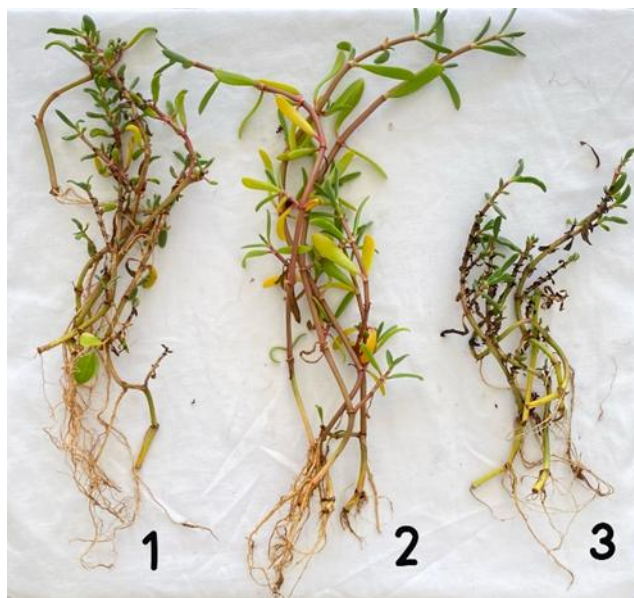


Figura 8. Comparación de Plantas

TABLA 3. Análisis de suelo *sesuvium portulacastrum*

Tratamiento	Amonio (mg/L)	Nitritos (mg/LT)	Fosforo (mg/L)	Nitratos (mg/LT)
1	0.021	0.008	0.031	0.953
2	0.019	0.027	0.016	5.626
3	0.018	0.070	0.052	2.596
4	0.067	0.190	0.527	8.405
5	0.109	0.806	0.243	6.323

Tabla 4. Análisis del suelo Guamuchilito

Parámetro	Interpretación	
Ph	Baja de 7.48 - 6.8 (30 días), luego sube a 7.28 (60 días). Dentro del rango neutro (6.6 - 7.3) al final. Posible actividad microbiana/fitorremediadora.	
CE	Disminuye de 2.12 - 1.55. se reduce la salinidad a un nivel “despreciable”	
MO	Ligeramente baja de 1.44 - 1.41, sigue a nivel bajo sin mejora significativa.	
NO	Se mantiene estable (-50 mg/kg), dentro del rango medio, sin cambio relevante.	
P	Baja de 20.54 - 18.20, sigue en rango alto, pero con leve pérdida.	
K	Establece alrededor 0.7 - 0.8, dentro del rango alto.	
Ca,Mg,Na	Calcio y magnesio aumentan, en rango “alto” y “muy alto” respectivamente, sodio permanece alto.	
:Micronutrientes (Fe, Cu, Zn, Mn)	Fe mejora levemente (adecuado). Cu mejora de 3.79 - 5.24 (adecuado) Zn se mantiene adecuado. Mn levemente menor al final, pero sigue adecuado (8)	
Textura:	% Arena: 25.50 % Arcilla:45.50 % Limo: 29.00	Arcilloso

En la tabla 5 mejoró la CE, Cu, estabilidad en nutrientes, adecuación del pH. Posible éxito moderado de la planta al estabilizar salinidad y metales del suelo. La textura franco arcillosa facilitó la retención de nutrientes y agua, contribuyendo al crecimiento vegetal y al proceso de biorremediación.

Tabla 5. Análisis del suelo Lunar salado

Parámetro	Interpretación	
Ph	Disminuye ligeramente, de 7.68 - 7.0, luego sube a 7.24, mejora al final hacia neutralidad.	
CE	Baja de 4.72 – 3.57, sigue alta, pero mejora significativamente.	
MO	De 1.52 - 1.42, sigue siendo baja sin mejora.	
NO	Sin cambio (50),	
P	Baja de 25.31 – 21.96, aun rango alto.	
K	Disminuye de 1.87 – 1.42, sigue en rango alto.	
Ca,Mg,Na	Estables Ca y Mg en niveles adecuados, Na también estable y alto.	
:Micronutrientes (Fe, Cu, Zn, Mn)	Fe mejora (8.20 – 9.51). Cu mejora (5.64 – 6.80) ahora adecuado Zn sube (7.47 – 8.03) Mn disminuye (10.79 – 9.21) sigue en rango adecuado	
Textura:	% Arena: 25.50 % Arcilla:45.50 % Limo: 29.00	Arcilloso

En la tabla 6 se observó con, éxito en la reducción de salinidad (CE) y mejora de micronutrientes. Sin embargo, no mejoro MO. Es probable que la planta este absorbiendo/metabolizando ciertos metales.

La textura favoreció la retención de humedad, y la planta contribuyo significativamente a la disminución de CE, demostrando alta capacidad de biorremediación en condiciones salinas.

Tabla 6. Análisis del suelo Boca del río

Parámetro	Interpretación	
Ph	Se mantuvo ligeramente alto (7.66 – 7.41), fuera del rango ideal.	
CE	Muy bajo desde el inicio (0.62 – 0.31), salinidad despreciable	
MO	Muy bajo (0.3 – 0.28). suelo pobre en materia orgánica	
NO3	Ausente desde el inicio. Suelo extremadamente pobre en nitrógeno	
P	Muy bajo (1.46 – 1.28), menor al mínimo requerido.	
K	Bajo (0.51 – 0.42)	
Ca,Mg,Na	Bajos, especialmente Ca, que sube 60 días, pero sigue deficiente	
:Micronutrientes (Fe, Cu, Zn, Mn)	Fe mejora (1.24 – 1.44) Cu se comportó irregular (baja a 0.04, luego 1,17). Zn y Mn mejoran ligeramente, pero siguen en el rango bajo adecuado.	
Textura:	% Arena: 90.00 % Arcilla: 8.00 % Limo: 2.00	Arcilloso

En la tabla 7 podemos observar que el suelo muy degradado desde el inicio. La planta no logra remediar efectivamente. No mejora MO, NO₃, ni nutrientes esenciales. Puede requerir enmiendas y apoyo externo (compost, biofertilizantes).

La textura arenosa, con alta porosidad y baja capacidad de retención de agua y nutrientes, junto con la escasa materia orgánica, limitaron el desarrollo de la planta y su capacidad para alternar las propiedades del suelo. No se observó una mejora significativa, evidenciando que este suelo no es adecuado para procesos de biorremediación sin enmiendas previas.

VIII. DISCUSIONES

Cambios en pH

En los resultados se observó una tendencia variable dependiendo del sitio estudiado. En Guamúchil, el pH disminuyó significativamente a los 30 días (6.8) respecto al valor inicial (7.48), seguido de un incremento parcial a los 60 días (7.28). Este patrón sugiere una acidificación del suelo asociada con la actividad rizosfera de *S. portulacastrum*, fenómeno también reportado por López et al. (2020), quienes observaron que la exudación en la raíz modifica los ácidos del suelo. Zhou et al. (2009) explica que esta especie tiene la capacidad de mantener el pH del suelo relativamente bajo debido a exudaciones de ácidos orgánicos en la raíz, mejorando la disponibilidad de nutrientes y promoviendo una mayor tolerancia a la salinidad. Esta acidificación transitoria favorece la movilidad de ciertos elementos y reduce la formación de sales solubles.

En contraste, Boca del Río se mantuvo relativamente estable (7.66 inicial y 7.41 a los 60 días), mientras que en Lunar se observó una reducción inicial marcada (7.68 a 7.06) y una posterior recuperación (7.24) (Tabla 1), comportamiento que se puede relacionar con la dinámica de cationes y materia orgánica (MO), como indica Moreno et al. (2018).

Conductividad eléctrica (CE)

Para los 3 sitios se observó una disminución progresiva de la CE a lo largo del tiempo. La reducción se registró en Lunar, con una CE inicial de 4.72 mmhos/cm descendiendo hasta 3.57 mmhos/cm a los 60 días (Tabla 1). Este resultado sugiere que *S. portulacastrum* favorece la remoción de sales solubles, posiblemente a través de la absorción iónica o exclusión activa de sales, lo cual concuerda con estudios previos donde se destaca su uso en suelos salinos (Galecio et al., 2025; Sanleri et al., 2025); John et al., 2024; Mamani et al., 2020)

En Boca del Río a pesar de su textura arenosa (90% arena), también se observó una disminución significativa de CE (0.62 a 0.31 mmhos/cm), lo cual evidencia la eficiencia de esta especie incluso en suelos de baja capacidad de retención.

Materia Orgánica (MO)

La MO presentó cambios mínimos, no significativos, especialmente en Boca del Río donde se mantuvo estable (0.3%) (Tabla 1). Sin embargo, en Guamúchil y Lunar, se detectaron pequeñas variaciones, que podrían relacionarse con la descomposición de residuos vegetales o incorporación de la biomasa radicular al suelo. Estos resultados sugieren que *S. portulacastrum*, al menos en corto plazo (60 días), no contribuye significativamente a la acumulación de MO, concordando con los hallazgos de Vega et al. (2017).

Nitratos (NO_3^-)

Se observó una disminución ligera en las concentraciones de nitratos en Guamúchil y Lunar (50-53 ppm) (Tabla 1), lo cual sugiere que el sistema suelo-planta no promovió la lixiviación ni asimilación de nitrógeno orgánico en forma de NO_3^- . En Boca del Río, los valores fueron nulos durante el estudio, probablemente debido a condiciones iniciales de baja fertilidad y poca retención de iones en el suelo arenoso.

Fósforo (P)

El contenido de P mostró una ligera disminución en Guamúchil y Lunar, siendo más marcada en este último (25.31 a 21.96 mg/kg), lo que sugiere un posible consumo por parte de *S. portulacastrum* o una fijación en formas menos disponibles. Según Hernández et al. (2019), la presencia de altos niveles de Ca y Mg pueden inducir la precipitación del P, especialmente en suelos con pH cercano a la neutralidad o ligeramente alcalinos, como en el presente estudio.

Potasio (K), Calcio (Ca), Magnesio (Mg) y Sodio (Na)

El K se mantuvo estable en la mayoría de los sitios, aunque en Lunar disminuyó significativamente a los 60 días (1.87 a 1.42 Cmol/kg) (Tabla 1), lo cual puede atribuirse a la absorción por parte de la planta. El Ca mostró un incremento en Guamúchil (15.76 a 19.50 Cmol/kg) (Tabla 1), probablemente por procesos de liberación desde cambios o aumentos de la solubilidad de compuestos, lo que coincide con Suárez et al. (2015) en suelos con alta actividad rizosférica. El Mg y Na se mantuvieron constantes en los tres sitios, indicando que estos iones no fueron significativamente afectados por la actividad de *S. portulacastrum*, al menos en el corto plazo evaluado.

Micronutrientes: Fe, Cu, Zn y Mn

En Lunar el Cu aumentó significativamente de 5.64 a 6.90 ppm (Tabla 1), lo cual puede deberse a procesos de solubilización inducidos por exudados ácidos de la raíz. El Zn y Mn presentaron aumentos y disminuciones ligeras en función del sitio, aunque en Boca del Río ambos disminuyeron progresivamente (Tabla 1). Esto puede deberse a una asimilación por parte de la planta, lo cual apoya su potencial como fitorremediador de metales, como ya ha sido propuesto por Ruiz et al. (2021).

Textura de suelo y su influencia

El tipo de suelo afectó significativamente la fitorremediación de *S. portulacastrum* (Tabla 1), donde el suelo franco-arcilloso facilitó la retención de nutrientes y agua ayudando a la fitorremediación y crecimiento de la planta; mientras que en el suelo con textura arenosa se presentó baja capacidad de retención de agua y nutrientes, junto con escasa materia orgánica, limitando el desarrollo vegetal y su capacidad para alterar las propiedades del suelo y fitorremediarlo. Aunque el conocimiento general sobre halófitas sugiere que prosperan en arena marina por su tolerancia a la salinidad.

A su vez el tipo de suelo tuvo un efecto directo en el crecimiento de las plantas mostrando la menor altura en la textura arenosa donde su propiedad limitó el desarrollo de la planta. Morgan y Conolly (2013) destacaron la importancia de las propiedades del suelo, como los niveles de nutrientes, textura, contenido de materia orgánica y disponibilidad de nutrientes afectando el rendimiento y productividad de plantas.

Altura de planta en cada suelo

En la figura 1 se puede observar la mayor altura de *S. portulacastrum* en suelo Lunar donde la planta respondió favorablemente al alto contenido inicial de nutrientes (P, K, Ca) y materia orgánica (Tabla 1). A pesar de la alta CE al inicio, esta disminuyó, y el entorno se volvió más favorable para el desarrollo vegetal. Así como la textura favoreció la retención de humedad, y la planta contribuyó significativamente a la disminución de CE, demostrando alta capacidad de fitorremediación en condiciones salinas. El suelo de Guamuchilito presento un intermedio, mostrando una altura progresiva, favorecido por un suelo con adecuados niveles de NO_3 , micronutrientes y una mejora de la conductividad eléctrica; a su vez la textura franco-arcillosa del suelo facilito la retención de agua y nutrientes, contribuyendo al crecimiento vegetal y fitorremediación por parte de *S. portulacastrum*. Mientras que en el suelo Boca del río se presentó la menor altura debido a un suelo pobre en nutrientes. La textura arenosa del suelo, con alta porosidad y baja capacidad de retención de agua y nutrientes, junto con la escasa materia orgánica, limitaron el crecimiento de las plantas y su capacidad para alterar las propiedades del suelo. No se observó una mejora significativa, a pesar de ser el suelo de origen de *S. portulacastrum*.

Los resultados del estudio indican una influencia significativa en la textura de suelo y la concentración de sal en la tasa de crecimiento de *S. portulacastrum*, mostrando la menor altura en su suelo de origen (Boca del río) con textura arenosa la mayor en el suelo Lunar con textura franco-arenosa, sugiriendo que las condiciones óptimas de salinidad pueden estimular la fisiología de la planta mejorando su altura. Concordando con el trabajo de Shahba et al. (2012) donde se presentó una reducción de altura en *Paspalum vaginatum* bajo estrés salino.

IX. CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos y el análisis estadístico realizado, se concluye que la especie evaluada presentó efectos significativos en la modificación de las propiedades químicas del suelo, particularmente en la reducción de la conductividad eléctrica (CE), la modulación del pH y la movilización selectiva de nutrientes como calcio (Ca), hierro (Fe) y cobre (Cu), principalmente en suelos con características salinas o alcalinas. Estos hallazgos confirman su potencial como alternativa viable en programas de fitorremediación de suelos afectados por salinidad.

Se determinó que la eficacia del proceso de biorremediación vegetal está estrechamente relacionada con las condiciones fisicoquímicas iniciales del suelo, especialmente la textura, la fertilidad y la capacidad de retención de humedad. En suelos de textura franco arcillosa, como Guamuchilito y Lunar, se registró una disminución significativa de la CE, una mayor movilización de micronutrientes y un crecimiento vegetal sostenido. En contraste, en el suelo

arenoso de Boca del Río, las limitaciones físicas y nutrimentales restringieron tanto el desarrollo de la planta como su capacidad de modificar las propiedades edáficas.

El análisis de la relación entre crecimiento vegetal y disponibilidad nutrimental evidenció que el tipo de suelo tuvo un efecto directo sobre la altura de la planta y su actividad fitorremediadora. Se observó que mayores contenidos de nutrientes disponibles, niveles moderados de sales solubles y adecuada materia orgánica favorecieron el crecimiento y la mejora progresiva del suelo.

En el suelo Guamuchilito, la planta mostró un crecimiento constante de 13 a 26 cm en un periodo de 40 días, asociado a niveles adecuados de nitratos (NO_3^-) y micronutrientes (Zn,

Mn, Fe), así como a una disminución de la CE. La textura franco arcillosa facilitó la retención de agua y nutrientes, contribuyendo positivamente al proceso de remediación.

En el suelo Lunar (Saldo), se registró el mayor crecimiento vegetal, con un incremento de 14 a 34 cm (20 cm en 40 días). Este comportamiento se relacionó con un mayor contenido inicial de fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca) y materia orgánica. A pesar de presentar una CE elevada al inicio del experimento, esta disminuyó progresivamente, generando condiciones más favorables para el desarrollo vegetal y evidenciando una alta eficiencia biorremediadora en condiciones salinas.

Por el contrario, en el suelo Boca del Río se observó el menor crecimiento (7 cm en 40 días), atribuible a bajos niveles de nitratos (NO_3^-), fósforo (P) y materia orgánica. Aunque la CE inicial era baja, la textura arenosa —caracterizada por alta porosidad y baja capacidad de retención de agua y nutrientes— limitó el desarrollo vegetal y la modificación significativa de las propiedades químicas del suelo. En consecuencia, este tipo de suelo requiere la aplicación previa de enmiendas para optimizar su respuesta en programas de fitorremediación.

En términos generales, los resultados confirman que el éxito de la fitorremediación no depende exclusivamente de la tolerancia de la especie vegetal a la salinidad, sino también de las condiciones edáficas iniciales. Por tanto, la implementación de esta estrategia debe sustentarse en un diagnóstico integral del suelo que permita seleccionar sitios con características favorables o establecer prácticas complementarias de acondicionamiento, garantizando así una mayor eficiencia en la rehabilitación de suelos salinizados.

Finalmente, se recomienda ampliar el periodo de evaluación en futuras investigaciones, a fin de determinar cambios a mediano y largo plazo en la dinámica de la materia orgánica, la estabilidad estructural del suelo y la sostenibilidad del proceso de remediación.

X. RECOMENDACIONES

En la elaboración del proyecto, puedo recomendar a CIIDIR la continuación del mismo, con la finalidad de llevar acabo en otros lugares no solo en el norte de Sinaloa para seguir limpiando suelos salinos para mejoras de productividad en el desarrollo óptimo de los cultivos, ya que cuando se estaba realizando la investigación nos dimos cuenta que en México debido a las malas prácticas agrícolas en los cultivos como consecuencia la salinización y la fitorremediación es menos costosa.

De igual manera recomiendo seguir trabajando con la planta *Sesuvium portulacastrum*, porque tienes muchas propiedades benéficas para el ser humano.

XI. FUENTES DE INFORMACIÓN

Aldesuquy, H., Baka, Z., Mickky, B., 2014. Kinetin and spermine mediated induction of salt tolerance in wheat plants: leaf area, photosynthesis and chloroplast ultrastructure of flag leaf at ear emergence. *Egyptian Journal of Basic and Applied Sciences*. 1: 77–87.

Alemendas, E., Chiari1 K., Hernández M., Herrera C., Valdés E., Vallester E., 2017. Evaluation of a wet biofiltro system of nitrate removal of ineffected fixed material from vertical flow up to laboratory scale. *Revista de Iniciación Científica, Journal of Undergraduate Research*. 3: 1-9.

Al-Azzawi, A., Alguboori, A., Hachim, M. Y., Najat, M., Al Shaimaa, A., Sad, M. 2012. Preliminary phytochemical and antibacterial screening of *Sesuvium portulacastrum* in the United Arab Emirates. *Pharmacognosy Research*. 4: 219–224.

APHA (American Public Health Association), 1998. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 20st ed, Washington, DC.

Ashraf, M., Foolad, M.R., 2007. Roles of glycinebetaine and proline in improving plant abiotic stress tolerance. *Environmental and Experimental Botany*. 59: 206–216.

Ashraf MY 2009. Salt tolerance mechanism in halophytes from Saudi Arabia and Egypt. *Research journal of agriculture and biological sciences*. 5: 191–206.

Bakkali F., Averbeck S., Averbeck D., Idaomar M., 2008. Biological effects of essential oils – a review, *Food and Chemical Toxicology*. 46: 446–475.

Bondad-Reantaso, M.G., S.E. McGladdery, I. East, and R.P. Subasinghe. 2001. Asia diagnostic guide to aquatic animal diseases. *FAO Fisheries Technical Paper No. 402, Supplement 2. Network of Aquaculture Centres in Asia-Pacific (NACA)*, and *FAO, Rome, ITA*.

Burge, E.J., D.J. Madigan, L.E. Burnett, and K.G. Burnett. 2007. Lysozyme gene expression by hemocytes of Pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei*, after injection with *Vibrio*. *Fish Shellfish Immunol.* 22: 327-339.

Carrillo, P., Grazia Annunziata, M., Pontecorvo, G., Fuggi, A., Woodrow, P., 2011. Salinity stress and salt tolerance. In: Shanker, A.K., Venkateswarlu, B. (Eds.), *Abiotic Stress in Plants- Mechanisms and Adaptations*. 21–38.

Castro, R.S., Borges Azevedo, C.M.S., Bezerra-Neto, F., 2006. Increasing cherry tomato yield using fish effluent as irrigation water in Northeast Brazil. *Sci. Hortic.-Amsterdam.* 110, 44–50.

Chandrasekaran M, Senthilkumar A, Venkatesalu V. 2011. Antibacterial and antifungal efficacy of fatty acid methyl esters from the leaves of *Sesuvium portulacastrum* L. *European Review for Medical and Pharmacological Sciences*. 775–780.

Cherian, S., Oliveira, M. 2005. Transgenic plants in phytoremediation: recent advances and new possibilities. *Environmental Science & Technology*. 39: 9377-9390.

Dajic, Z., 2006. Salt stress. In: Madhava Rao, K.V., Raghavendra, A.S., Janardhan Reddy, K. (Eds.), *Physiology and Molecular Biology of Stress Tolerance in Plant*. Springer, Amsterdam, The Netherlands. 41–99.

Davenport, R., James, R.A., Zakrisson-Plogander, A., Tester, M., Munns, R., 2005. Control of sodium transport in durum wheat. *Plant Physiology*. 3: 807–818.

Decamp, O., D.J. Moriarty, and P. Levens. 2008. Probiotics for shrimp larviculture: review of field data from Asia and Latin America. *Aquacult. Res.* 39: 334-338.

Dietz, A. C., Schnoor, J. L. 2001. Advances in phytoremediation. Environmental Health Perspectives. 109: 163-168.

Dracup, M.N.H., Greenway, H., 1985. A procedure for isolating vacuoles from leaves of the halophyte *Suaeda maritime*. Plant, Cell & Environment. 8: 149–154.

Edeogal H, Okwu D., Mbaebie B. 2005. Phytochemical constituents of some Nigerian medicinal plants. African Journal of Biotechnology. 685–688.

Fillatre Y., Rondeau D., Daguin A., Communal P.Y., 2016. A workflow for multiclass determination of 256 pesticides in essential oils by liquid chromatography tandem mass spectrometry using evaporation and dilution approaches: application to lavandin, lemon and cypress essential oils, Talanta 149: 178–186.

Ghaly, A.E., Kamal, M., Mahmoud, N.S., 2005. Phytoremediation of aquaculture wastewater for water recycling and production of fish feed. Environ. Int. 31: 1–13.

Glenn, E.P., Brown, J.J., Blumwald, E., 1999. Salt tolerance and crop potential of halophytes. Critical Reviews in Plant Sciences., 18: 227–255

Gottschall, C. Boutin, A. Crolla, C. Kinsley, P. 2007. Champagne The role of plants in the removal of nutrients at a constructed wetland treating agricultural (dairy) wastewater Ontario, Canada. Ecological Engineering. 29: 154-163.

Hajibagheri, M.A., Hall, J.L., Flowers, T.J., 1984. Stereological analysis of leaf cells of the halophyte *Suaeda maritime* (L.) dum. J. Environmental and Experimental Botany. 35: 1547–1557.

Hargreaves, J.A., 1998. Nitrogen biochemistry of aquaculture ponds. *Aquaculture*. 166: 181–212.

Hurkman, W.J., Rao, H.P., Tanaka, C.K., 1991. Germin like polypeptides increase in barley roots during salt stress. *Plant Physiology*. 97: 366–374.

Hasanuzzaman, M., Nahar, K., Fujita, M., et al., 2013. Enhancing plant productivity under salt stress—relevance of polyomics. In: Ahmad, P., Azooz, M.M., Prasad, M.N.V. (Eds.), *Salt Stress in Plants: Omics, Signaling and Responses*. Springer, Berlin, Germany. 113–156.

Hassiotis C.N., Lazari D.M. 2010. Decomposition process in the Mediterranean region. Chemical compounds and essential oil degradation from *Myrtus communis*, *International Biodeterioration y Biodegradation*. 64: 356–362.

Hewitt, E.J., 1966. Sand and water culture methods used in the study of plant nutrition. Commonwealth Bureau, Horticulture Technology. Com. 22: 431–446.

Kalaji, H.M., Govindjee, Bosa K., Koscielniak, J., Zuk-Gołaszewska, K., 2011. Effects of salt stress on photosystem II efficiency and CO₂ assimilation of two Syrian barley landraces. *Environmental and Experimental Botany*. 73: 64–72.

Komives, T., Gullner, G. 2005. Phase I xenobiotic metabolic systems in plants. *Z Naturforsch*. 60:179-185.

Kousar H. y Pavithra M. 2016. “Efficiency of water hyacinth (*Eichornia Crassipes*) in reduction of chemical oxygen demand (COD) from textile effluent,” *Imperial Journal of Interdisciplinary Research*. 2: 1071–1073.

Koyro, H.W., Khan, M.A., Lieth, H., 2011. Halophytic crops: a resource for the future to reduce the water crisis? *Emirates Journal of Food and Agriculture*. 23: 1–16.

Ksouri, R., Megdiche, K.W., Jallali, I., Debez, A., Magné, C., Hiroko, I., Abdelly, C., 2011. Medicinal halophytes: potent source of health promoting biomolecules with medical: nutraceutical and food applications. *Critical Reviews in Biotechnology*. 32: 1–38.

Laribi B., Kouki K., Bettaieb T., Mougou A., Marzouk B., 2013. Essential oils and fatty acids composition of Tunisian, German and Egyptian caraway (*Carum carvi* L.) seed ecotypes: a comparative study, *Industrial Crops and Products*. 41: 312–318.

Lezama-Cervantes, C., Paniagua-Michel, J.J., Zamora-Castro, J. 2010. Biorremediación de los efluentes de cultivo del camarón *Litopenaeus vannamei* (Boone, 1931) utilizando tapetes microbianos en un sistema de recirculación. *Latin American Journal of Aquatic Research*. 38: 129-142.

Lis-Balchin, M., Deans, S.G., 1997. Bioactivity of selected plant essential oils against *Listeria monocytogenes*. *Journal of Applied Bacteriology*. 82: 759–762.

Liu, J., Yang, C. Q., Zhang, Q., Lou, Y., Wu, H. J., Deng, J. C., 2016. Partial improvements in the flavor quality of soybean seeds using intercropping systems with appropriate shading. *Food Chemistry*. 207: 107–114.

Lokhande, V.H., Nikam, T.D., Suprasanna, P., 2009. *Sesuvium portulacastrum* (L.) L. a promising halophyte: cultivation, utilization and distribution in India. *Genetic Resources and Crop Evolution*. 56: 741-747.

Lokhande, V.H., Nikam, T.D., Patade, V.Y., Ahire, M.L., Suprasanna, P., 2011. Effects of optimal and supra-optimal salinity stress on antioxidative defence, osmolytes and in vitro growth responses in *Sesuvium portulacastrum* L. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*. 104: 41-49.

Lokhande, V.H., Gor, B.K., Desai, N.S., Nikam, T.D., Suprasanna, P., 2013. *Sesuvium portulacastrum*, a plant for drought, salt stress, sand fixation, food and phytoremediation. A review. *Agronomy for Sustainable Development*. 33: 329-348.

Lopez, F., Vansuyt, G., Fourcroy, P., Case-Delbart, F., 1994. Accumulation of a 22-kDa protein and its mRNA in the leaves of *Raphanus sativus* in response to salt stress or water stress. *Plant Physiology*. 91: 605–614.

Macek T, Mackova M, Kas J 2000. Exploitation of plants for the removal of organics in environmental remediation. In: Suresh B, Ravishankar GA (2004) *Phytoremediation—a novel and promising approach for environmental clean-up*. *Critical Reviews in Biotechnology*. 24: 97–124.

Magwa ML, Gundidza M, Gweru N, Humphrey G (2006) Chemical composition and biological activities of essential oil from the leaves of *Sesuvium portulacastrum*. *Journal of Ethnopharmacology*. 103:85–89.

Manousaki E., Kalogerakis N. 2011. *Phytoremediation*. 13: 959-969.

Marcum, K.B., Murdoch, C.L., 1992. Salt tolerance of the coastal salt marsh grass, *Sporobolus virginicus* (L.). *New Phytologist*. 120: 281–288.

Merkel N, Schultze-Kraft R, Infante C 2004. *Phytoremediation in the tropics—the effect of crude oil on the growth of tropical plants*. *Bioremediation*. 8: 177–184.

Merkl N, Schultze-Kraft R, Infante C 2005. Phytoremediation of petroleum-contaminated soils. *Water Air Soil Pollut* 165: 195–209.

Marin, K., Stirnberg, M., Eisenhut, M., 2006. Osmotic stress in *Synechocystis* sp. PCC 6803: low tolerance towards nonionic osmotic stress results from lacking activation of glucosylglycerol accumulation. *Microbiology*. 152: 2023–2030.

Menzel U, Leith H (1999) Annex 4: halophyte database vers. 2. In: Leith H, Moschenko M, Lohmann M, Koyro HW, Hamdy A (eds) *Halophyte uses in different climates*, 1. Ecological and ecophysiological studies. *Progress in Biotechnology* 13: 159–258.

Megdiche, W., Chaouachi, F., M'Rabet, R., Medini, F., Zaouali, Y., Trabelsi, N., Ksouri, R., Noumi, E., Abdelly, C., 2011. Antioxidant and antimicrobial properties of *Frankenia thymifolia* Desf. fractions and their related biomolecules identification by gas chromatography/mass spectrometry (GC/MS) and high performance liquid chromatography (HPLC). *Journal of Medicinal Plants Research*. 5: 5754–5765.

Messedi, D., Labidi, N., Grignon, C., Abdelly, C., 2004. Limits imposed by salt to the growth of the halophyte *Sesuvium portulacastrum*. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 167: 720–725.

Mittler, R., 2006. Abiotic stress: the field environment and stress combination. *Trends in Plant Science*. 11: 15–19.

Moraes A., Almeida L., Costa M. 2006. Effects of the essential oil from *Citrus aurantium* L. in experimental anxiety models in mice. *Life Sciences*. 78: 1720 – 1725.

Mougin C. 2002. Bioremediation and phytoremediation of industrial PAH-polluted soils. Polycyclic Aromatic Compounds. 22: 1011–1043.

Muchate N. S., Nikalje G. C., Rajurkar N. S., Suprasanna P., Nikam T. D., 2016. Physiological responses of the halophyte *Sesuvium portulacastrum* to salt stress and their relevance for saline soil bio-reclamation. 224: 96–105.

Mukherjee B., Majumdar M., Gangopadhyay A., Chakraborty S., Chatterjee D., 2015. “Phytoremediation of parboiled rice mill wastewater using water lettuce (*Pistia Stratiotes*),” International Journal of Phytoremediation. 17: 651–656.

Munns R., 1993. Physiological processes limiting plant growth in saline soils: some dogmas and hypotheses. Plant, Cell & Environment. 16: 15–24.

Munns R., Schachtman, D.P., Condon, A.G., 1995. The significance of a two-phase growth response to salinity in wheat and barley. Australian Journal of Plant Physiology. 22: 561–569.

Munns R., James, R.A., Lauchli, A., 2006. Approaches to increasing the salt tolerance of wheat and other cereals. Journal of Experimental Botany. 57: 1025–1043.

Munn, R., Termaat, A., 1986. Whole-plant responses to salinity. Australian Journal of Plant Physiology. 13: 143–160.

Munns R., Tester, M., 2008. Mechanisms of salinity tolerance. Annual Review of Plant Biology. 59: 651–681.

Neori, A., Shpigel, M., & Ben-Ezra, y D. (2000). A sustainable integrated system for culture of fish, seaweed and abalone. Aquaculture, 186, 279–291.

Nuraini Y., Felani M. 2015. "Phytoremediation of tapioca wastewater using water hyacinth plant (*Eichornia Crassipes*)," *Journal of Degraded and Mining Land management*. 2: 295– 302.

Paquin D, Ogoshi R, Campbell S, Li QX (2002) Bench-scale phytoremediation of polycyclic aromatic hydrocarbon-contaminated marine sediment with tropical plants. *International Journal of Phytoremediation* 4: 297–313.

Parida, A.K., Das, A.B., 2005. Salt tolerance and salinity effect on plants: a review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 60: 324–349.

Parihar, P., Singh, S., Singh, R., Singh, V.P., Prasad, S.M., 2015. Effect of salinity stress on plants and its tolerance strategies: a review. *Environmental Science and Pollution Research*. Res. <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-014-3739-1>

Pardo S., Suárez H., Soriano E. 2006. Tratamiento de efluentes: una vía para la acuicultura responsable *Revista MVZ Córdoba*. 11: 20-29.

Patil A.V., Lokhande V.H., Suprasanna P., Bapat V.A., Jadhav J.P. 2012. *Planta*. 235: 1051-1063

Peer WA, Baxter IR, Richards EL, Freeman JL, Murphy AS 2005. Phytoremediation and hyperaccumulator plants. In: Tamas M, Martinoia E (eds) *Molecular biology of metal homeostasis and detoxification*, Topics in current genetics. Springer, Berlin. 14: 299–340.

Perdones A., Escriche I., Chiralt A., Vargas M.. 2016. Effect of chitosan–lemon essential oil coatings on volatile profile of strawberries during storage. *Food Chemistry* 197: 979–986.

Prasad MNV 2003. La ecofisiología vegetal: una ciencia de síntesis; Capitulo 36 Fitorremediación. Aplicaciones, ventajas e inconvenientes. Thomson-Paraninfo. 1075-1110.

Paraninfo SA Reeves RD 2003. Tropical hyperaccumulators of metals and their potential for phytoextraction. Plant and Soil. 249: 57–65.

Ramani B., Reeck T., Debez A., Stelzer R., Huchzermeyer B., Schmidt A., Papenbrock J., 2006. Aster tripolium L. and Sesuvium portulacastrum L.: two halophytes, two strategies to survive in saline habitats, Plant Physiology and Biochemistry. 395-408.

Ramos, R., L. Vinatea & R. da Costa. 2008. Tratamiento de efluentes del cultivo de Litopenaeus vannamei por sedimentación y filtración por la ostra Crassostrea rhizophorae. Lat. Am. J. Aquat. Res., 36: 235-244.

Reichenauer, T.G., Germida, J. J. 2008. Phytoremediation of organic contaminants in soil and groundwater. ChemSusChem. 1: 708- 717.

Rojas, A., Hernandez, L., Rogeho, P.M., Mata, R., 1992. Screening for antimicrobial activity of crude drug extracts and pure natural products from Mexican medicinal plants. Journal of Ethnopharmacology. 35: 127– 149.

Rhodes, D., Hanson, A.D., 1993. Quaternary ammonium and tertiary sulfonium compounds in higher plants. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology. 44: 357–384.

Rhodes, D., Rich, P.J., Brunk, D.G., Ju, G.C., Rhodes, J.C., Pauly, M.H., Hansen, L.A., 1989. Development of two isogenic sweet corn hybrids differing for glycinebetaine content. *Plant Physiology*. 91: 1112–1121.

Saccol E., Uczay J., Pês T., Finamora I., Ouriquea G., Riffele A., Schmidt D., Caronc B., Heinzmann B., Llesuyf S., Lazzarid R., Baldisserotto B., Pavanato M. 2013. Addition of *Lippia alba* (Mill) N. E. Brown essential oil to the diet of the silver catfish: an analysis of growth, metabolic and blood parameters and the antioxidant response, *Aquaculture*. 416: 244-254.

Silveira, J.A.G., Araújo, S.A.M., Lima, J.P.M.S., Viégas, R.A., 2009. Roots and leaves display contrasting osmotic adjustment mechanisms in response to NaCl-salinity in *Atriplex nummularia*. *Environmental and Experimental Botany*. 1: 1–8.

Singh, N.K., Bracken, C.A., Hasegawa, P.M., Handa, A.K., Buckel, S., Hermodson, M.A., Pfankoch, F., Regnier, F.E., Bressan, R.A., 1987. Characterization of osmotin. A thaumatin-like protein associated with osmotic adjustment in plant cells. *Plant Physiology*. 85: 529–536.

Singh, M., Kumar, J., Singh, S., Singh, V.P., Prasad, S.M., 2015. Roles of osmoprotectants in improving salinity and drought tolerance in plants: a review. *Reviews in Environmental Science and BioTechnology*.

Sooknah R., Wilkie A. 2004 “Nutrient removal by floating aquatic macrophytes cultured in anaerobically digested flushed dairy manure wastewater,” *Ecological Engineering*. 22: 27–42.

Suresh B, Ravishankar GA 2004. Phytoremediation—a novel and promising approach for environmental clean-up. *Critical Reviews in Biotechnology*. 24: 97–124.

Slama, I., Ghnaya, T., Messedi, D., Hessini, K., Labidi, N., Savoure, A., Abdelly, C., 2007. Effect of sodium chloride on the response of the halophyte species *Sesuvium portulacastrum* grown in mannitol-induced water stress. *Journal of Plant Research*. 120: 291-299.

Slama, I., Ghnaya, T., Savoure, A., Abdelly, C., 2008. Combined effects of long-term salinity and soil drying on growth, water relations, nutrient status and proline accumulation of *Sesuvium portulacastrum*. *Comptes Rendus Biologies*. 331: 442-451.

Slama, I., Tayachi, S., Jdey, A., Roueched, A., Abdelly, C., 2011. Differential response to water deficit stress in alfalfa (*Medicago sativa*) cultivars growth, water relation, osmolyte accumulation and lipid peroxydation. *African Journal of Biotechnology*. 10: 16250–16259.

Strikland, J., Parsons, T., 1972. *A Practical Handbook of Seawater Analysis*. Fish Research Board of Canada Bulletin, Ottawa, Canada. 167: 131-135.

Taju, G., Madan, N., Abdul Majeed, S., Kumar, T. R., Thamizhvanan, S., Otta, S. K., & Sahul Hameed, A. S. (2015). Immune responses of whiteleg shrimp, *Litopenaeus vannamei* (Boone, 1931), to bacterially expressed dsRNA specific to VP28 gene of white spot syndrome virus. *J Fish Dis*, 38(5), 451-465. doi: 10.1111/jfd.12256

Tangahu B, Abdullah S, Basri H, Idris M, Anuar N, Mukhlisin M. 2011. A review on heavy metals (As, Pb, and Hg) uptake by plants through phytoremediation. *International Journal of Chemical Engineering*. 31p.

Teixeira B., Marques A., Ramos C., Batista I., Serrano C., Matos O., Neng N.R., Nogueira J.M.F., Saraiva J.A., Nunes M.L. 2012. European pennyroyal (*Mentha pulegium*) from Portugal: chemical composition of essential oil and antioxidant and antimicrobial properties of extracts and essential oil. *Industrial Crops and Products*. 36: 81-87.

Turcios, A.E., Papenbrock, J., 2014. Sustainable treatment of aquaculture effluents what can we learn from the past for the future? Sustainability. 6: 836–856.

UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization), 1983. Chemical Methods for Use in Marine Environmental Monitoring. Manual and Guides. Intergovernmental Oceanographic Commission, Paris, France.

Varela, A., N. Peña. 2015. Hepatopancreatitis necrotizante asociada al Fenómeno del Niño, en cultivos de camarones del Golfo de Nicoya. Repertorio Científico. 18:29-34.

Villaseñor R., J. L. y F. J. Espinosa G., 1998. Catálogo de malezas de México. Universidad Nacional Autónoma de México. Consejo Nacional Consultivo Fitosanitario. Fondo de Cultura Económica. México, D.F.

Wang W.1991. "Ammonia toxicity to macrophytes (common duckweed and rice) using static and renewal methods," environmental Toxicology and Chemistry. 10: 1173–1177.

Watson S. B., Whitton B. A., Higgins S., and Wehr J. D. 2015, Harmful Algal Blooms. Freshwater Algae of North America, vol. 20, Academic Press, 2nd, Chapter 20 edition, Wyn Jones, R.G., 1980. An assessment of quaternary ammonium and related compounds as osmotic effectors in crop plants. In: Rains, D.W., Valentine, R.C. (Eds.), Genetic Engineering of Osmoregulation: Impact on Plant Productivity for Food, Chemicals and Energy. Plenum Press, New York. 55–170.

Xi, D., Liu, C., Su, Y.-C., 2012. Effects of green tea extract on reducing *Vibrio parahaemolyticus* and increasing shelf life of oyster meats. *Food Control*. 25: 368–373.

Zhou, Y., Shao, H.B., 2008. The responding relationship between plants and environment is the essential principle for agricultural sustainable development on the globe. *Comptes Rendus Biologies*. 331: 321–328.

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), 12223. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-16266-4>

Chaves, M. M., Flexas, J., & Pinheiro, C. (2009). Photosynthesis under drought and salt stress: Regulation and adaptation mechanisms. *Annals of Botany*, 103(4), 551-560. <https://doi.org/10.1093/aob/mcn125>

Flowers, T. J., & Colmer, T. D. (2008). Salinity tolerance in plants—Revisited. *Frontiers in Plant Science*, 4, 1-11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00412>

Hasegawa, P. M., Bressan, R. A., Zhu, J. K., & Bohnert, H. J. (2000). Plant cellular and molecular responses to high salinity. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 51, 463-499. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.51.1.463>

Munns, R. (2005). Genes and salt tolerance: Bringing them together. *New Phytologist*, 167(3), 645-663. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2005.01487.x>

Munns, R., & Tester, M. (2008). Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review of Plant Biology*, 59, 651-681. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092911>

Qadir, M., Qureshi, R. H., & Schubert, S. (2007). Salt-induced land degradation and its management in arid ecosystems. *Journal of Arid Environments*, 68(1), 79-107. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2006.04.016>

Rodríguez, E., Medina, J., & Pire, J. (2013). *The effect of soil salinityAhmadi, 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), 12223. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-16266-4>

Chaves, M. M., Flexas, J., & Pinheiro, C. (2009). Photosynthesis under drought and salt stress: Regulation and adaptation mechanisms. *Annals of Botany*, 103(4), 551-560. <https://doi.org/10.1093/aob/mcn125>

Flowers, T. J., & Colmer, T. D. (2008). Salinity tolerance in plants—Revisited. *Frontiers in Plant Science*, 4, 1-11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00412>

Hasegawa, P. M., Bressan, R. A., Zhu, J. K., & Bohnert, H. J. (2000). Plant cellular and molecular responses to high salinity. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 51, 463-499. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.51.1.463>

Munns, R. (2005). Genes and salt tolerance: Bringing them together. *New Phytologist*, 167(3), 645-663. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2005.01487.x>

Munns, R., & Tester, M. (2008). Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review of Plant Biology*, 59, 651-681. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092911>

Qadir, M., Qureshi, R. H., & Schubert, S. (2007). Salt-induced land degradation and its management in arid ecosystems. *Journal of Arid Environments*, 68(1), 79-107. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2006.04.016>

Rodríguez, E., Medina, J., & Pire, J. (2013). *The effect of soil salinity

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), 12223. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-16266-4>

Chaves, M. M., Flexas, J., & Pinheiro, C. (2009). Photosynthesis under drought and salt stress: Regulation and adaptation mechanisms. *Annals of Botany*, 103(4), 551-560. <https://doi.org/10.1093/aob/mcn125>

Flowers, T. J., & Colmer, T. D. (2008). Salinity tolerance in plants—Revisited. *Frontiers in Plant Science*, 4, 1-11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00412>

Hasegawa, P. M., Bressan, R. A., Zhu, J. K., & Bohnert, H. J. (2000). Plant cellular and molecular responses to high salinity. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 51, 463-499. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.51.1.463>

Munns, R. (2005). Genes and salt tolerance: Bringing them together. *New Phytologist*, 167(3), 645-663. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2005.01487.x>

Munns, R., & Tester, M. (2008). Mechanisms of salinity tolerance. Annual Review of Plant Biology, 59, 651-681. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092911>

Qadir, M., Qureshi, R. H., & Schubert, S. (2007). Salt-induced land degradation and its management in arid ecosystems. Journal of Arid Environments, 68(1), 79-107. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2006.04.016>

Rodríguez, E., Medina, J., & Pire, J. (2013). *The effect of soil salinity

* Ali, H., Khan, E., & Sajad, M. A. (2013). Phytoremediation of heavy metals—Concepts and applications. *Chemosphere*, 91(7), 869–881. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.01.075

* Cherian, S., & Oliveira, M. M. (2005). Transgenic plants in phytoremediation: Recent advances and new possibilities. *Environmental Science & Technology*, 39(24), 9377–9390. https://doi.org/10.1021/es051134l

* Cunningham, S. D., & Ow, D. W. (1996). Promises and prospects of phytoremediation. *Plant Physiology*, 110(3), 715–719. https://doi.org/10.1104/pp.110.3.715

* Dietz, A. C., & Schnoor, J. L. (2001). Advances in phytoremediation. *Environmental Health Perspectives*, 109(Suppl 1), 163–168. https://doi.org/10.1289/ehp.01109s1163

* González-Alcaraz, M. N., Muñoz-Rojas, M., & Tejada, M. (2022). Phytoremediation in tropical and subtropical regions: A review of recent progress and future challenges. *Journal of

Environmental Management*, 307, 114510.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114510>

* Guerra Sierra, B. E., Muñoz Guerrero, J., & Sokolski, S. (2021). Phytoremediation of heavy metals in tropical soils: An overview. *Sustainability*, 13(5), 2574.
<https://doi.org/10.3390/su13052574>

* Khatoon, Z., Orozco-Mosqueda, M. del C., & Santoyo, G. (2024). Microbial contributions to heavy metal phytoremediation in agricultural soils: A review. *Microorganisms*, 12(10), 1945.
<https://doi.org/10.3390/microorganisms12101945>

* Komives, T., & Gullner, G. (2005). Phase I xenobiotic metabolism in plants. In B. J. Singh, L. J. Singh (Eds.), *Plant Metabolism and Biotechnology* (pp. 105–122). Wiley.

* Kousar, S., Javed, I., Khan, A., & Yasmeen, G. (2016). Application of water hyacinth for the removal of COD from textile wastewater. *Desalination and Water Treatment*, 57(25), 11575–11583.

* Mukherjee, S., Chatterjee, S., & Chatterjee, S. (2015). Remediation of wastewater using aquatic plants: An environmental approach. *Journal of Environmental Science and Health*, 50(2), 153–159.

* Nuraini, M., Rahmah, A., & Harahap, M. (2015). The ability of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) to reduce the BOD levels in wastewater. *Procedia Environmental Sciences*, 28, 594–600.

* Prasad, M. N. V. (2007). **Phytoremediation: Advances in biochemical and molecular biology**. Springer.

* Reeves, R. D., & Baker, A. J. M. (2000). Metal-accumulating plants. In I. Raskin & B. D. Ensley (Eds.), **Phytoremediation of toxic metals: Using plants to clean up the environment** (pp. 193–229). Wiley.

* Slama, I., Abdelly, C., Bouchereau, A., Flowers, T., & Saviouré, A. (2007). Diversity, distribution and roles of osmoprotective compounds accumulated in halophytes under abiotic stress. **Annals of Botany**, 99(5), 967–977.

* Vangronsveld, J., Herzig, R., Weyens, N., Boulet, J., Adriaensen, K., Ruttens, A., ... & Mench, M. (2009). Phytoremediation of contaminated soils and groundwater: Lessons from the field. *

* Ali, H., Khan, E., & Sajad, M. A. (2013). Phytoremediation of heavy metals—Concepts and applications. **Chemosphere**, 91(7), 869–881.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.01.075>

* González-Alcaraz, M. N., Muñoz-Rojas, M., & Tejada, M. (2022). Phytoremediation in tropical and subtropical regions: A review of recent progress and future challenges. **Journal of Environmental Management**, 307, 114510.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114510>

* Khatoon, Z., Orozco-Mosqueda, M. del C., & Santoyo, G. (2024). Microbial contributions to heavy metal phytoremediation in agricultural soils: A review. **Microorganisms**, 12(10), 1945.

<https://doi.org/10.3390/microorganisms12101945>

* Rabêlo, K. C., Moreschi, A., da Silva, J. T., & Barbosa, M. C. (2022). Combining phytoremediation with bioenergy production: Developing a multi-criteria decision matrix for plant species selection. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(21), 32158–32171. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20018-0>

* Vangronsveld, J., Herzig, R., Weyens, N., Boulet, J., Adriaensen, K., Ruttens, A., ... & Mench, M. (2009). Phytoremediation of contaminated soils and groundwater: Lessons from the field. *Environmental Science and Pollution Research*, 16(7), 765–794. <https://doi.org/10.1007/s11356-009-0213-6>

- Flowers, T. J., & Colmer, T. D. (2008). Salinity tolerance in halophytes. *New Phytologist*, 179(4), 945–963. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02531.x>

- Lokhande, V. H., Nikam, T. D., Penna, S., & Suprasanna, P. (2013). *Sesuvium portulacastrum*, a plant for drought, salt stress and phytoremediation. In P. Ahmad, M. N. V. Prasad (Eds.), *Environmental Adaptations and Stress Tolerance of Plants in the Era of Climate Change* (pp. 343–358). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-0815-4_16

- Lokhande, V. H., & Suprasanna, P. (2012). Prospects of halophytes in understanding mechanisms of salt tolerance. *The Journal of Plant Interactions*, 7(4), 249–258. <https://doi.org/10.1080/17429145.2012.702850>

- Parida, A. K., & Das, A. B. (2005). Salt tolerance and salinity effects on plants: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 60(3), 324–349. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2004.06.010>
 - Radhakrishnan, K. V., Vasanth, K., Kumar, C. U., & Mani, A. (2021). Genetic diversity and reproductive traits of coastal halophytes: A focus on *Sesuvium portulacastrum*. *Plant Ecology*, 222(5), 655–668. <https://doi.org/10.1007/s11258-021-01120-y>
 - Raja, V., Lokhande, V. H., & Suprasanna, P. (2020). Phytoremediation of metal-contaminated coastal environments using *Sesuvium portulacastrum*: A field-scale review. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(1), 233–248. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06758-2>
 - Slama, I., Abdelly, C., Bouchereau, A., Flowers, T. J., & Saviouré, A. (2007). Diversity, distribution and roles of osmoprotective compounds accumulated in halophytes under abiotic stress. *Annals of Botany*, 99(5), 967–977. <https://doi.org/10.1093/aob/mcm125>
 - Dassanayake, M. D., & Fosberg, F. R. (1980). *A Revised Handbook to the Flora of Ceylon* (Vol. 1). Amerind Publishing Co.
- Flowers, T. J., & Colmer, T. D. (2008). Salinity tolerance in halophytes. *New Phytologist*, 179(4), 945–963. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02531.x>

Lokhande, V. H., & Suprasanna, P. (2012). Prospects of halophytes in understanding mechanisms of salt tolerance. *The Journal of Plant Interactions*, 7(4), 249–258. <https://doi.org/10.1080/17429145.2012.702850>

Wagner, W. L., Herbst, D. R., & Sohmer, S. H. (1990). *Manual of the flowering plants of Hawai'i* (Vol. 1 & 2). University of Hawai'i Press. Suárez, L., Medina, D., & González, R. (2015). Disponibilidad de calcio en suelos salinos y su influencia sobre la fertilidad edáfica. *Ciencia y Agricultura*, 29(1), 44–53.

Ruiz, M., Pérez, G., & Salgado, N. (2021). Fitorremediación de metales pesados mediante halófitas: Un enfoque ecológico. *Revista Chilena de Fitorremediación*, 10(2), 101–115.

Hernández, M. J., Salas, A., & Pérez, D. (2019). Interacciones entre calcio y fósforo en suelos agrícolas de zonas semiáridas. *Suelo y Nutrición Vegetal*, 23(1), 33–42.

López, F., Ramírez, O., & Silva, A. (2020). Cambios en el pH del suelo por actividad rizosférica de plantas halófitas. *Ciencia del Suelo y Restauración Ecológica*, 15(1), 55–63.

John, J. E., Thangavel, P., Maheswari, M., Balasubramanian, G., Kalaiselvi, T., Kokiladevi, E., & Ramesh, A. (2024). *Sesuvium portulacastrum* mitigates salinity induced by irrigation with paper and pulp mill effluent. *International Journal of Environmental Studies*, 81(3), 1420-1432. DOI: <https://doi.org/10.1080/00207233.2022.2055346>

Mamani Flores, J., Arzabe Maure, O., & Andrade Foronda, D. (2020). Evaluación de la capacidad de fitodesalinización de cuatro halófitas en un suelo salino-sódico. *Revista de Agricultura (Bolivia)*, (62).

Galecio Mío, J. J., Tarazona Dionicio, R. I., & Castañeda-Olivera, C. A. (2025). Salinity Reduction in Agricultural using *Sesuvium Portulacastrum* and *Aptenia Cordifolia*. *CET Journal-Chemical Engineering Transactions*, 117.

Sanleri, K. A., Kumi, F., Amoah, K. K., Amamu, S., Luketina, I., & Adu, M. O. (2025). Identifying and Evaluating Salt-Tolerant Halophytes Along a Tropical Coastal Zone: Growth Response and Desalination Potential. *Plant-Environment Interactions*, 6(4), e70072.

Morgan, J. B., and E. L. Connolly. 2013. "Plant-Soil Interactions: Nutrient Uptake." *Nature Education Knowledge* 4, no. 8: 2.

SAS Institute Inc. (2013). SAS® 9.4 software [Software]. SAS Institute Inc.

Shahba, M. A., S. F. Alshammary, and M. S. Abbas. 2012. "Effects of Salinity on Seashore Paspalum Cultivars at Different Mowing Heights." *Crop Science* 52, no. 3: 1358–1370. <https://doi.org/10.2135/cropsci2011.06.0337>.

Vega, J., Morales, E., & Pineda, A. (2017). Materia orgánica y su dinámica en suelos tratados con especies vegetales nativas. *Boletín de Ecología Aplicada*, 22(1), 34–41.

Zhou, L. L., J. Cao, F. S. Zhang, and L. Li. 2009. "Rhizosphere Acidification of Faba Bean, Soybean and Maize." *Science of the Total Environment* 407, no. 14: 4356–4362.

