

RESPUESTA DE *Chenopodium ambrosioides* L. AL ESTRÉS POR NaCl *

Ayenia C. Rosales-Nieblas¹, Francisco H. Ruiz-Espinoza², Bernardo Murillo-Amador³, Pablo Preciado-Rangel⁴, Luis G. Hernández-Montiel³ y Tomás Rivas-García⁵

RESUMEN

En las zonas áridas, el estrés por salinidad es uno de los estreses abióticos más predominantes que causan pérdidas significativas en la producción agrícola. El objetivo del estudio fue evaluar las características morfo-fisiológicas de *Chenopodium ambrosioides* L. para determinar su tolerancia al estrés por NaCl. El diseño fue completamente al azar con cinco concentraciones de NaCl (0, 50, 100, 150 y 200 mM) con cuatro repeticiones por tratamiento de 15 plantas cada uno. Las variables morfométricas evaluadas fueron peso seco de parte aérea, peso seco de raíz, área foliar, longitud de masa y longitud total de raíz. Las variables fisiológicas evaluadas fueron tasa fotosintética, conductancia estomática, CO₂ intercelular, tasa de transpiración, contenido relativo de agua, potencial hídrico y temperatura de la hoja. Los resultados mostraron que *C. ambrosioides* es una planta que tolera hasta 100 mM de NaCl en relación con el peso seco de parte aérea, longitud de masa y total de raíz. En relación con las variables fisiológicas, mostró capacidad para tolerar hasta 50 mM NaCl pues el contenido relativo de agua, tasa fotosintética, conductancia estomática y CO₂ intercelular, disminuyeron a partir de 50 mM NaCl, mientras que, la tasa de transpiración se redujo a partir de los 150 mM NaCl.

Palabras clave adicionales: Epazote, tolerancia a NaCl, variables morfo-fisiológicas

ABSTRACT

Response of *Chenopodium ambrosioides* L. to NaCl-stress

In arid zones, salinity stress is one of the most predominant abiotic stresses which causes significant losses in agricultural production. The objective of this study was to evaluate the physiological and morphometric characteristics of *Chenopodium ambrosioides* L. to determine its tolerance to NaCl-stress. The experiment used a completely randomized design with five NaCl concentrations (0, 50, 100, 150 and 200 mM) with four replications per treatment of 15 plants each. The morphometric variables evaluated were dry weight of aerial part, dry weight of root, leaf area, length of root mass and total root length. The physiological variables were photosynthetic rate, stomatal conductance, intercellular CO₂, transpiration rate, relative water content, water potential, and leaf temperature. The results showed that *C. ambrosioides* is a plant that tolerates up to 100 mM NaCl in relation to the dry weight of the aerial part, length of root mass and total root length. In relation to the physiological variables, the results showed the ability of epazote to tolerate up to 50 mM NaCl since the relative water content, photosynthetic rate, stomatal conductance, and intercellular CO₂ decreased from 50 mM NaCl, while the transpiration rate decreased from 150 mM NaCl.

Additional keywords: Epazote, morpho-physiological variables, tolerance to NaCl

Editora asociada: Prof. María Elena Sanabria

INTRODUCCIÓN

La salinidad es un problema que afecta los suelos y la producción agrícola en el mundo

(Hameed et al., 2021). La presencia de sal en las células vegetales altera muchos procesos metabólicos básicos, lo que contribuye a efectos negativos y graves en el desarrollo y crecimiento

Recibido: Diciembre 21, 2023

Aceptado: Julio 3, 2024

*Trabajo presentado por el primer autor como requisito parcial para obtener el grado de Ingeniero Agrónomo en el Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. La Paz, Baja California Sur, México

¹ Faculty of Agriculture, Tottori University, Tottori, Japan. e-mail: ayenia.rn@hotmail.com

² Universidad Autónoma de Baja California Sur. La Paz, Baja California Sur, México. e-mail: fruiz@uabcs.mx

³ Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. La Paz, Baja California Sur, México.

e-mail: bmurillo04@cibnor.mx (autor de correspondencia); lhernandez@cibnor.mx

⁴ Instituto Tecnológico de Torreón. Ejido Ana, Coahuila, México. e-mail: ppreciador@yahoo.com.mx

⁵ Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, estado de México, México. e-mail: trivas@pg.cibnor.mx

de las plantas (Chaudhry y Sidhu, 2022). La calidad del suelo es susceptible a una variedad de estreses, que incluyen sequía, temperatura, deterioro debido a la erosión, y otros factores tales como el aumento de la salinidad debido a la evaporación y/o las prácticas de riego. La salinidad inhibe el crecimiento y desarrollo de las plantas (Akyol et al., 2020), afectando los procesos celulares, incluida la alteración de la homeostasis celular, la alteración de la fotosíntesis, el procesamiento del ARNm, la transcripción, la síntesis de proteínas, la alteración del metabolismo energético, la biosíntesis de aminoácidos y el metabolismo de los lípidos (Abdelhamid et al., 2020). La salinización continúa amenazando los rendimientos, pues pocas de las especies cultivadas actualmente toleran una quinta parte de la concentración de NaCl en el agua de mar, por lo que se necesitan nuevas variedades de cultivos actuales o nuevos cultivos para sostener la agricultura en muchas regiones del mundo (Kotula et al., 2020). Algunos de estos cultivos o especies pueden ser las plantas medicinales o aromáticas, que tienen importancia en los comercios locales e internacionales por el número de artículos que se elaboran y, además, se utilizan para producir materiales especiales como biocidas, cosméticos, medicamentos, aceites esenciales, tintes y colorantes (Parvin et al., 2023). En especies de los géneros *Atriplex*, *Suaeda* y *Chenopodium* de la familia Chenopodiaceae se ha estudiado el efecto asociado de la salinidad y la temperatura en la germinación (Ungar, 1995). El epazote (*Chenopodium ambrosioides* L.) es una hierba aromática anual o perenne originaria de América tropical, con un fuerte efecto aleloquímico en las plantas circundantes (Hu et al., 2015; Chen et al., 2015; Chen et al., 2016). En México tiene diferentes usos, sus raíces, inflorescencias y hojas, tiene usos medicinales, como condimento, vermífugo, abortifaciente, emenagogo, antihelmíntico, entre otros (Zavala et al., 2016); se consume al igual que otras especies de quelites que aportan proteínas, aminoácidos, minerales (Ca, Mg y Zn), vitaminas (C y E) y fibra; son una fuente importante de compuestos bioactivos, como ácidos fenólicos (ácido cafeico, ferúlico) y flavonoides (quercetina, kaempferol, espinacetina), carotenoides, ácido α -linolénico y betalainas, que presentan actividad antioxidante elevada (Santiago et al., 2019).

En México, en 2022 se cosecharon 171.1 ha de epazote fresco con una producción anual de 2,386.32 t y un rendimiento promedio de 13,95 t·ha⁻¹; los estados productores fueron Baja California, Estado de México, Tlaxcala y Puebla (SIAP, 2023). Por su parte, los estudios de investigación asociados a *C. ambrosioides* se refieren a la determinación de sus usos etnomédicos, componentes químicos y propiedades farmacológicas (Kasali et al., 2021); se ha probado el aceite esencial y su principal constituyente - α -terpineno- en la actividad antibacteriana (Oliveira et al., 2018). Los estudios recientes reportan la evaluación del efecto de tres concentraciones de la solución nutritiva Steiner sobre el crecimiento y producción de epazote cultivado en invernadero (Aguilar et al., 2021). El epazote es una especie promisoría para el Estado de Baja California Sur (BCS) toda vez que, la explotación de los recursos de aguas subterráneas es de gran importancia y se ha vuelto muy crucial en las últimas décadas, especialmente en las zonas costeras de las regiones áridas y semiáridas. Los acuíferos costeros de estas regiones corren especial riesgo debido a la intrusión de agua marina salada (Alfarrah y Walraevens, 2023). El acuífero de La Paz, BCS, presenta intrusión por agua de mar un exceso de extracción. Cruz et al. (2023) mostró que, muchos pozos agrícolas presentan entre 1000 y 2000 mg L⁻¹, observando una concentración alta de NaCl y CaCl₂ con evolución muy similar al de los sólidos totales disueltos, cuyo incremento y permanencia se atribuye a la intrusión de agua de mar, derivado del incremento de las extracciones de agua en los pozos agrícolas.

Si bien la mayoría de las especies cultivadas no toleran la salinidad, es importante evaluarlas para determinar su tolerancia e integrarlas al cultivo en hidroponía utilizando agua salobre en el proceso de producción. La revisión de literatura no mostró estudios acerca del efecto de la salinidad (NaCl) en la morfometría y fisiología de epazote. El objetivo de este estudio fue evaluar las características morfo-fisiológicas de plantas de *Chenopodium ambrosioides* L. cultivadas en un medio hidropónico de tipo raíz flotante con el fin de conocer su capacidad para tolerar diferentes concentraciones de NaCl.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio de estudio. El estudio se realizó en el Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. (CIBNOR) en el interior de una estructura de malla antiáfidos con orificios de 0,4×0,8 mm, color blanco, con 40 % de sombra. El CIBNOR se localiza en los terrenos costeros de El Comitán, a 24° 08' N y 110° 24' W, 7 msnm, a 17 km al oeste de la ciudad de La Paz, estado de Baja California Sur, México, con un clima del tipo Bw (h') hw (e) considerado como semiárido, con vegetación xerófila (García, 2004).

La información climática registrada directamente en el sitio del ensayo reportó valores de temperatura máxima y mínima de 27,1 y 10,5 °C, respectivamente durante el período del ensayo, mientras que la humedad relativa máxima y mínima fue de 96 y 46 %, respectivamente.

Material vegetal. El ecotipo de epazote (*Chenopodium ambrosioides* L.) utilizado se adquirió en la empresa local Agro Star Green en La Paz, B.C.S., México.

Manejo del experimento. Las semillas de epazote se sembraron en charolas de poliestireno de 200 cavidades con un volumen de 10,87 cm³ y profundidad de 4.3 cm por cada cavidad, que contenían como sustrato comercial sogemix (Sogemix VT-M, Premier) el cual contiene turba de *Sphagnum canadiense* (65-75 % vol.), vermiculita, cal dolomítica y calcítica, macronutrientes, micronutrientes y un agente humectante. La humedad se mantuvo aplicando riegos diarios con el fin de lograr una emergencia homogénea de las plántulas. El trasplante se realizó cuando las plántulas presentaron una altura promedio de 5 cm y se colocaron en macetas para hidroponía con un volumen de 71,66 cm³ y una altura de 5 cm que contenían el mismo sustrato comercial a base de vermiculita y se colocó una planta por maceta. Previo a llenar las macetas con el sustrato, dentro de cada maceta se colocó de manera vertical una tira de 10 cm de longitud de tela absorbente a través de la cual el agua ascendía hacia el sustrato y lo mantuvo húmedo en el tiempo en que las raíces aún no habían logrado un contacto firme con el medio de cultivo.

Diseño experimental. El experimento se estableció en un diseño completamente al azar, con tratamientos de estrés con cinco concentraciones de NaCl (0, 50, 100, 150 y 200

mM) con cuatro repeticiones por tratamiento y 15 plantas por cada repetición para un total de 300 plantas para todo el ensayo. Las concentraciones de NaCl se prepararon tomando en cuenta el peso molecular del NaCl, calculando la cantidad por litro y extrapolando dicha cantidad al volumen (25 L) de la caja de plástico utilizada como contenedor para hidroponía.

Colocación de macetas en hidroponía. Las macetas se colocaron en una placa de poliestireno de alta densidad a la cual se le realizó un orificio, de tal manera que permitiera insertar alrededor de 1/4 de la maceta en dicha placa. En cada placa se colocaron 15 macetas y posteriormente las placas se introdujeron en cajas de plástico cerradas con capacidad de 45 L. La caja de plástico se aforó con 25 L de agua sin sales procedente de la planta desaladora del CIBNOR, con una conductividad eléctrica de 0,10 dS·m⁻¹. La solución nutritiva se preparó de acuerdo con Samperio (1997) adicionando (en g·L⁻¹ de agua destilada) nitrato de potasio (53,33), nitrato de amonio (10,2), fosfato mono amónico (14,8), nitrato de calcio (60,2), sulfato de magnesio (42,0), sulfato ferroso (2,0), sulfato de manganeso (0,5), sulfato de zinc (0,1), sulfato de cobre (0,1), ácido bórico (0,1). Los tratamientos a base de NaCl se aplicaron una vez que las plantas se adaptaron a la hidroponía, aproximadamente a los 27 días después del trasplante, con el fin de evitar un shock osmótico, lo cual se verificó al observar las primeras raíces que emergieron de la maceta. El NaCl se agregó cada 48 h en concentraciones de 25 mM hasta alcanzar la concentración de los tratamientos (50, 100, 150 y 200 mM NaCl). Posteriormente y por única ocasión, se realizó el cambio de agua hidropónica, añadiendo de nuevo las concentraciones de NaCl. El pH de la solución se midió diariamente y se mantuvo en un rango de 6,0 a 6,5 el cual se considera el pH adecuado para que las plantas absorban los nutrientes, ajustándolo con KOH o H₂SO₄ según se requirió.

Cosechas. Las cosechas de los tallos y hojas se iniciaron cuando las plantas mostraron un tamaño comercial entre 15 a 20 cm de altura para un total de cuatro cosechas.

Variables morfológicas de la parte aérea. El tallo y las hojas, una vez cortados, se trasladaron al laboratorio de Fisiotecnia Vegetal, para cuantificar el peso seco y la longitud. Las hojas se separaron del tallo y se midió el área

foliar mediante un integrador de área foliar (Li-Cor, modelo LI-3000A). El peso seco de ambos órganos se determinó mediante una balanza analítica luego de secarlos en una estufa a temperatura de 80 °C por 72 horas.

Variables morfométricas de raíz. En la cosecha final se extrajo toda la planta para evaluar las variables morfométricas de la raíz. La longitud de masa radical, la cual se corresponde a la extensión de donde se concentra la mayor cantidad de raíces, así como la longitud total, se determinaron utilizando una regla graduada. El peso seco de la masa radical se obtuvo luego de secada en estufa como ya se indicó.

Variables fisiológicas. Las variables fisiológicas se cuantificaron con el analizador infrarrojo de CO₂ de Li-Cor modelo 6400XTP y fueron tasa fotosintética (P_n), tasa de transpiración (E), conductancia estomática (g_s), CO₂ intercelular (C_i) y temperatura de la hoja. Las variables se determinaron en hojas completamente expandidas a diferentes períodos de tiempo y posterior a la aplicación del NaCl. Al inicio del experimento se etiquetó una planta por tratamiento y repetición, a la cual se le realizaron mediciones semanales durante el periodo de experimentación, para un total de cinco evaluaciones. Se determinó el promedio de cada variable a lo largo del experimento. El contenido relativo de agua (CRA) se midió mediante el método de Yamasaki y Dillenburg (1999) de la manera siguiente: se colectaron hojas de la sección media de la planta; individualmente se removieron y se pesaron para obtener el peso fresco (PF). El peso turgente (PT) se determinó al colocar las hojas en agua destilada dentro de una caja Petri, y durante ese proceso se pesaron periódicamente hasta peso constante. Posteriormente, las muestras se colocaron en una estufa a 80 °C con el fin de obtener el peso seco (PS). El peso del material vegetal se determinó con la báscula analítica. Los valores de PF, PT y PS se utilizaron para calcular el CRA usando la ecuación siguiente, $CRA (\%) = [(PF-PS) / (PT-PS)] \times 100$.

El potencial hídrico se evaluó alrededor del mediodía solar que, en La Paz, BCS, se alcanza a las 12:18 h, utilizando un medidor de potencial hídrico de suelo o muestras botánicas (WP4-T, Decagon Devices).

Análisis estadístico. Los datos de las variables independientes se sometieron a un análisis de

varianza y comparación múltiple de medias (Tukey HSD $p=0,05$). El análisis de correlación simple se realizó mediante el coeficiente de Pearson ($p=0,05$). Los análisis estadísticos se realizaron con el programa de cómputo Statistica v. 13.5.0.17, Tibco Software 2018 (Santa Clara, CA, USA). Las variables independientes expresadas en valores porcentuales se normalizaron mediante transformación angular.

RESULTADOS

Variables morfométricas de parte aérea. Los análisis de varianza mostraron que, todas las variables morfométricas aéreas presentaron diferencias significativas entre las concentraciones de NaCl (Cuadro 1). El peso seco de parte aérea disminuyó conforme las concentraciones de NaCl incrementaron, mostrando valores superiores en 0, 50 y 100 mM de NaCl. El peso seco de las plantas tratadas con 200 mM disminuyó 45 y 41 % respecto al control, respectivamente. La respuesta del área foliar fue similar, pues disminuyó conforme las concentraciones de NaCl incrementaron, con valores superiores en 0 mM NaCl. El área foliar en las plantas sometidas a 200 mM disminuyó 54 % con respecto al control. El análisis de correlación mostró que, el NaCl presentó una correlación lineal significativa ($P \leq 0,05$, $n=20$) y negativa con las variables morfométricas aéreas (Cuadro 1).

Variables morfométricas de la raíz. El análisis de varianza mostró que, todas las variables morfométricas de raíz presentaron diferencias entre las concentraciones de NaCl (Cuadro 2). El peso seco de masa radicular mostró valores superiores en la concentración 0 mM y disminuyó al aumentar el NaCl. La longitud de masa radical y total de raíz no disminuyeron conforme se incrementó el NaCl, toda vez que, en 50 y 100 mM NaCl, los valores fueron similares a los mostrados en 0 mM; sin embargo, ambas variables mostraron los valores menores en 200 mM NaCl, al igual que el peso seco de masa radical. La disminución porcentual de las variables en 200 mM con respecto al control fue de 59, 82 y 76 % para peso seco, longitud de masa radical y longitud total de raíz, respectivamente. El análisis de correlación mostró que el NaCl se correlacionó lineal y significativa ($P \leq 0,05$, $n=20$)

y negativa-mente con las variables morfométricas de raíz (Cuadro 2).

Variabes fisiológicas. El análisis de varianza mostró que, ninguna de las variables fisiológicas presentó diferencias significativas entre las concentraciones de NaCl (Cuadro 3). El contenido relativo de agua presentó los valores máximos en el control (0 mM) y disminuyó conforme las concentraciones de NaCl aumentaron. La tasa de fotosíntesis, la conductancia estomática, el CO₂ intercelular y la tasa de transpiración mostraron una respuesta similar al contenido relativo de agua, presentando valores superiores en el control y disminuyendo conforme las concentraciones de NaCl incrementaron, mostrando los valores inferiores en 200 mM NaCl

El potencial hídrico fue menos negativo en el control y aumentó sus valores negativos conforme la concentración del NaCl incrementó, mostrando los valores más negativos en 200 mM NaCl. La temperatura de la hoja mostró un comportamiento

contrario, pues ésta se incrementó en 200 mM y disminuyó conforme las concentraciones de NaCl disminuyeron. La reducción porcentual de las variables fisiológicas en 200 mM con respecto al control fue de 11, 27, 57, 31 y 38 % para CRA, tasa de fotosíntesis, conductancia estomática, CO₂ intercelular y tasa de transpiración, respectivamente. El potencial hídrico en 200 mM con respecto al control disminuyó en un 61 %, mostrando valores más negativos conforme se incrementó el NaCl en el medio de cultivo. La temperatura de la hoja en 200 mM incrementó 10 % con respecto a la temperatura de la hoja en el control. El análisis de correlación mostró que el NaCl se correlaciona de manera lineal significativa ($P \leq 0,05$, $n=20$) y negativa con las variables fisiológicas CRA, tasa de fotosíntesis, conductancia estomática, CO₂ intercelular, tasa de transpiración, potencial hídrico y temperatura de la hoja (Cuadro 2).

Cuadro 1. Valores promedio de variables morfométricas en tallo y hojas de plantas de *Chenopodium ambrosioides* sometidas a cinco concentraciones de NaCl.

NaCl (mM)	Peso seco (g·planta ⁻¹)	Área foliar (cm ² ·planta ⁻¹)
0	1,52±0,09 a	246,44±10,41 a
50	1,49±0,02 a	211,20±2,55 b
100	1,47±0,09 ab	193,51±5,81 b
150	1,28±0,03 bc	165,28±4,77 c
200	0,90±0,04 c	113,44±3,39 d
Valor de <i>p</i> (ANOVA)	0,000029	0,001
Valor de correlación	-0,79	-0,96
Valor de <i>p</i>	0,001	0,001

*Valores promedio en columna con distinta literal difieren estadísticamente (Tukey HSD $p=0,05$). Los datos representan el valor promedio ± el error estándar de cuatro cosechas.

DISCUSIÓN

La respuesta de disminución de los valores de las variables morfométricas conforme las concentraciones de NaCl incrementaron, demostró que el epazote no es una especie que tolere el estrés por NaCl; sin embargo, se debe considerar que, el peso seco de tallos y hojas en 50 y 100 mM mostró similitud estadística con los valores obtenidos en el control.

La reducción de las variables morfométricas incluyendo el área foliar es una respuesta común

de los efectos del estrés salino en las especies vegetales, pues éste disminuye la capacidad de absorción de agua, que se manifiesta en una reducción de la expansión foliar y del número de hojas, así como la pérdida de turgencia en el tallo y las hojas (Sangoquiza et al., 2021). La disminución en las variables peso seco y área foliar a partir de la aplicación del NaCl se debe al estrés osmótico y al efecto de los iones específicos Cl y Na, pues estos disminuyen el potencial

osmótico de la solución, causan un desbalance nutricional y reducen la disponibilidad del agua para la planta (Terrazas, 2019).

El área foliar de las plantas de epazote fue mayormente afectada en 200 mM, lo que denota que, la especie no presenta tolerancia a la salinidad, pues el área foliar se considera una de las variables propuestas como una característica suficiente para conocer la tolerancia a la salinidad de las especies vegetales (Cárdenas et al., 2020). Si bien la respuesta de epazote al NaCl no lo determina como una especie tolerante a la salinidad, las plantas mostraron una característica de incrementar la longitud de raíz en 100 mM, lo cual es una característica reportada en otras especies que producen raíces más largas en relación con tratamientos de salinidad menor, atribuyendo esto al mecanismo de inducción de la raíz para localizar espacios de concentración salina menor en el suelo y así, evadir el estrés

salino. En este estudio, las plantas de epazote disminuyeron la longitud de raíz en 150 y 200 mM, y la incrementaron en 100 mM. El peso seco de raíz de las plantas de epazote fue mayormente afectado por el NaCl; sin embargo, el peso seco del tallo y hojas disminuyó en menor proporción con respecto a otras variables, tales como el área foliar. Al respecto, Ilangumaran y Smith (2017) atribuyeron la reducción de la biomasa seca a la restricción en el crecimiento celular, debido al potencial bajo de agua del medio externo y a la interferencia de los iones salinos con la nutrición de las plantas o a la toxicidad de iones acumulados que conducen a la muerte celular. Asimismo, la acumulación menor de biomasa se atribuye al exceso de sales que causan daños celulares a través del proceso de transpiración en las hojas y por toda la planta, inhibiendo el crecimiento (Shahid et al., 2020).

Cuadro 2. Valores promedio de variables morfométricas de raíz de plantas de *Chenopodium ambrosoides* sometidas a cinco concentraciones de NaCl.

NaCl (mM)	Peso seco de masa radicular (g·planta ⁻¹)	Longitud de masa radicular (cm)	Longitud total de raíz (cm)
0	1,38±0,79 a	28,07±0,54 a	52,26±1,68 a
50	1,19±0,03 b	25,39±0,56 abc	43,22±1,40 b
100	1,18±0,05 bc	26,22±1,28 ab	45,68±2,24 ab
150	1,01±0,04 c	25,12±1,06 bc	42,41±1,98 b
200	0,81±0,07 d	22,88±0,98 c	39,79±3,47 b
Valor de <i>p</i> (ANOVA)	0,00008	0,02	0,01
Valor de correlación	-0,86	-0,65	-0,63
Valor de <i>p</i>	0,001	0,002	0,003

*Valores promedio en columna con distinta literal difieren estadísticamente (Tukey HSD $p=0,05$). Los datos representan el valor promedio \pm el error estándar.

En este estudio, el efecto del NaCl en las variables fisiológicas fue evidente. La supresión de la fotosíntesis derivado del estrés salino se ha reportado en otras especies vegetales (Yang et al., 2020). El estrés por sal causa efectos a corto y largo plazo en la fotosíntesis. A corto plazo el efecto ocurre después de algunas horas o dentro de 1 o 2 días del inicio de la exposición y esta respuesta es importante, porque existe un cese total de la asimilación de carbono dentro de horas (Zhang et al., 2018). El efecto a largo plazo ocurre después de varios días de la exposición a la sal y la reducción en la asimilación de carbono es debido a la acumulación de sal en las hojas en desarrollo (Zhang et al., 2018). La fotosíntesis no

es ralentizada por la salinidad e incluso es estimulada por concentraciones bajas de sal (Ma et al., 2020). Esto último coincide con los datos obtenidos en este estudio, pues se observó que, la fotosíntesis de las plantas de epazote tratadas con 50 mM NaCl solo redujeron la tasa de fotosíntesis en un 4 % respecto a las plantas del control (0 mM). En las plantas tratadas con 100 mM la tasa de fotosíntesis disminuyó 11 % respecto a la fotosíntesis de las plantas del control, siendo un poco más severa la reducción en 150 mM (13 %) pero la disminución en 200 mM fue de 11 %, similar a la reducción presentada en 100 mM. De acuerdo con Muhammad et al. (2021), la disminución de la tasa fotosintética se debe a

varios factores, deshidratación de las membranas celulares que reducen su permeabilidad al CO₂, toxicidad de la sal, reducción de suministro de CO₂ por cierre hidrológico de estomas, aumento de la senescencia y cambios de actividad enzimática por cambios en estructura citoplásmica. En este estudio, al menos dos de los

efectos fueron evidentes, la toxicidad por NaCl y la senescencia de las plantas inducida por el NaCl. La reducción de la actividad fotosintética depende también de dos características de la salinización, es decir la concentración total de sal y su composición iónica

Cuadro 3. Valores promedio de variables fisiológicas de plantas de *Chenopodium ambrosioides* sometidas a cinco concentraciones de NaCl.

NaCl (mM)	Contenido relativo de agua (%)	Tasa fotosintética (μmol CO ₂ ·m ⁻² ·s ⁻¹)	Conductancia estomática (mol H ₂ O·m ⁻² ·s ⁻¹)	CO ₂ intercelular (μmol CO ₂ ·mol ⁻¹)
0	86,52±0,88 a	15,77±0,37 a	0,28±0,026 a	314,79±4,24 a
50	82,70±0,85 b	14,82±0,70 b	0,21±0,020 b	278,07±6,57 b
100	77,35±1,19 c	14,00±0,56 b	0,17±0,012 bc	244,05±3,65 c
150	75,58±0,45 c	14,24±0,47 b	0,17±0,016 bc	239,51±4,77 cd
200	76,81±0,81 c	11,53±0,92 c	0,12±0,015 c	215,98±1,94 e
ANOVA (<i>p</i>)	0,000001	0,004	0,002	0,001
Correlación	-0,85	-0,72	-0,83	-0,95
<i>p</i> -value	0,001	0,001	0,001	0,001
		Tasa de transpiración (mmol H ₂ O·m ⁻² ·s ⁻¹)	Potencial hídrico (-MPa)	Temperatura de la hoja (°C)
0		6,51±0,49 a	2,77±0,13 a	30,79±0,17 e
50		5,83±0,26 ab	3,36±0,21 ab	31,73±0,12 d
100		5,03±0,16 b	3,74±0,20 bc	32,54±0,14 c
150		5,46±0,12 b	4,11±0,20 cd	33,29±0,08 b
200		4,03±0,25 c	4,46±0,23 d	33,80±0,07 a
ANOVA (<i>p</i>)		0,003	0,003	0,001
Correlación		-0,78	-0,85	-0,97
<i>p</i> -value		0,001	0,001	0,001

*Valores en cada columna con distinta literal difieren estadísticamente (Tukey HSD $P \leq 0,05$). Los datos representan el valor promedio ± el error estándar de cinco evaluaciones

La conductancia estomática fue una de las variables fisiológicas mayormente afectadas por el NaCl, con un promedio de 40 % de disminución considerando todas las concentraciones de NaCl respecto al control (0 mM). La reducción de la conductancia estomática se atribuye al potencial hídrico más negativo de las hojas al incrementar el NaCl en el medio de cultivo, así como a la reducción en el contenido relativo de agua por efecto del NaCl; ambas variables en conjunto provocaron pérdida de turgencia de las hojas, reduciendo al mismo tiempo las tasas de fotosíntesis y de transpiración, resultados que coinciden con los reportados por Meguekam et al. (2021). El grado en que el cierre estomático afectó la capacidad fotosintética se indica por la

magnitud de la reducción en la conductancia estomática. También fue evidente que, la reducción de la tasa de fotosíntesis y la tasa de transpiración disminuyeron por efecto del incremento de la temperatura de la hoja, pues ambas variables mostraron una correlación lineal significativa y negativa con la temperatura de la hoja (tasa de fotosíntesis; $r = -0,71$ $p = 0,0001$, $n = 20$; tasa de transpiración; $r = -0,72$, $p = 0,0001$, $n = 20$). Si bien la disminución de la tasa de fotosíntesis se atribuye en parte a la reducción de la conductancia estomática, también se le atribuye a la disminución de pigmentos fotosintéticos (Muhammad et al., 2021). En una publicación previa, Rosales et al. (2019) encontraron que las plantas de epazote incrementaron el contenido de

pigmentos de clorofila presentando mayor contenido ante dosis elevadas de salinidad, lo cual permitiría considerarla como una especie moderadamente tolerante a la sal, como se ha demostrado en otras especies de plantas cultivadas; por ejemplo, las palmas datileras tolerantes a la sal, las cuales pueden mantener el vigor del crecimiento al ser capaces de mantener la asimilación de CO₂ protegiendo los pigmentos fotosintéticos (Yaish y Kumar, 2015). El CO₂ intercelular también fue afectado por el NaCl, disminuyendo hasta un 31 % en 200 mM y una reducción promedio de 22 % considerando todas las concentraciones de NaCl. En las plantas de epazote también fue evidente que, al disminuir la tasa de fotosíntesis con el incremento de las concentraciones de NaCl, se presentó el cierre parcial de los estomas, lo que condujo a una reducción de la presión parcial de CO₂ intracelular, coincidiendo con los resultados reportados por Sarabi et al. (2019). El contenido relativo de agua también disminuyó conforme la concentración de NaCl incrementó en el medio de cultivo, lo cual se atribuye al movimiento del agua desde la zona de mayor a menor potencial, pero que está ligado a las características de cada especie o variedad. Por su parte, el potencial hídrico fue más negativo conforme incrementaron las concentraciones de NaCl. En la disminución del CRA, tuvo un efecto directo, pues se asocia a la disminución de la intensidad de flujo de agua desde la raíz a la parte aérea, porque a una conductancia estomática menor le corresponderá un intercambio de vapor de agua menor y, por tanto, menor transpiración y como consecuencia un menor movimiento del agua en la planta, lo que conlleva a una hidratación menor de los órganos de la planta, provocando una depresión en los potenciales osmóticos, lo cual coincide con lo reportado por Goto et al. (2021).

En otras especies de la misma familia y género del epazote como es *Chenopodium album*, se reporta que, esta especie presenta una capacidad notable para mantener una germinación alta en condiciones de estrés salino (Tanveer y Shah, 2017). Por su parte, *Chenopodium quinoa* Willd. puede crecer en condiciones de suelos duros y desarrollar semillas en concentraciones de salinidad tan altas como las que se encuentran en el agua de mar (Adolf et al., 2012). Este atributo en la quinua se ha estudiado exhaustivamente, en

particular los mecanismos fisiológicos y moleculares implicados en el desarrollo del cultivo en suelos salinos y, aquellos específicamente relacionados con la acumulación de iones (Na y Cl) en tejidos especializados y el ajuste del potencial hídrico de las hojas (Adolf et al., 2013). La quinua acumula iones de sal en sus tejidos ajustando el potencial hídrico en las hojas, lo que le permite a la planta mantener la turgencia celular y limitar la transpiración en condiciones salinas (Shabala et al., 2012). La búsqueda de literatura sobre la tolerancia de epazote al estrés salino no mostró reportes sobre el tema; sin embargo, en un informe de Bech et al. (2002) mencionan que *Chenopodium ambrosioides* es una especie tolerante a la salinidad y que mostró un valor bajo de acumulación de metales pesados en la parte aérea, en plantas seleccionadas en diferentes sitios de minería en Sudamérica.

CONCLUSIONES

Las plantas de *Chenopodium ambrosioides* L. mostraron la capacidad de tolerar hasta 100 mM de NaCl en relación con el peso seco de parte aérea, longitud de masa radicular y longitud total de raíz; sin embargo, el área foliar se redujo a partir de los 50 mM NaCl. En relación con las variables fisiológicas, mostraron la capacidad de tolerar hasta 50 mM NaCl pues el contenido relativo de agua, tasa fotosintética, conductancia estomática y CO₂ intercelular, disminuyeron a partir de los 50 mM NaCl, mientras que, la tasa de transpiración se redujo a partir de los 150 mM NaCl. La complejidad en el grado de tolerancia al NaCl y en el modelo de respuesta de *C. ambrosioides* al estrés por NaCl, evidencian la diversidad de estrategias que desarrolla la especie a través de su curso evolutivo. La valoración de la tolerancia de *C. ambrosioides* al estrés por NaCl determinó que, se requiere realizar otros estudios para evidenciar los mecanismos específicos de tolerancia y como acentúan ciertas variables a altas concentraciones de NaCl.

AGRADECIMIENTOS

A la Dra. María del Carmen Mercado Guido, Ing. Griselda Peña Armenta, Dr. Ibán Murillo Murillo e Ing. Celina Beltrán Camacho. A Pedro Luna García, Raymundo Ceseña Núñez, Adrián

Jordán Castro e Ing. Saúl Briseño Ruíz. La investigación se realizó con apoyos de proyectos nacionales del Consejo Sudcaliforniano de Ciencia y Tecnología, del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías y del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C., así como con recursos de un proyecto internacional financiado por la Agencia de Cooperación Internacional de Japón (JICA), la Agencia de Ciencia y Tecnología de Japón (JST) y la Universidad de Tottori, Japón.

LITERATURA CITADA

1. Abdelhamid, M.T., A. Sekara, M. Pessarakli, J.J. Alarcon, M. Brestic, H. El-Ramady et al 2020. New approaches for improving salt stress tolerance in rice. In: Rice Research for Quality Improvement: Genomics and Genetic Engineering; Roychoudhury, A., Ed.; Springer: Singapore.
2. Adolf, V.I., S. Shabala, M.N. Andersen, F. Razzaghi y S.E. Jacobsen. 2012. Varietal differences of quinoa's tolerance to saline conditions. *Plant and Soil* 357(1-2): 117-129.
3. Adolf, V.I., S.E. Jacobsen y S. Shabala. 2013. Salt tolerance mechanisms in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Environmental and Experimental Botany* 92: 43-54.
4. Aguilar-Carpio, C., S.V. González-Maza, P. Juárez-López, I. Alia-Tejacal, F. Palemón-Alberto, Y.R. Arenas-Julio y A.S. Escalante-Estrada. 2021. Análisis de crecimiento de epazote (*Chenopodium ambrosioides* L.) cultivado en invernadero. *Biotecnia* 23(2): 113-119.
5. Akyol, T.Y., O. Yilmaz, B. Uzılday, R.Ö. Uzılday y İ. Türkan. 2020. Plant response to salinity: An analysis of ROS formation, signaling, and antioxidant defense. *Turkish Journal of Botany* 44: 1-13.
6. Bech, J., C. Poschenrieder, J. Barceló y A. Lansac. 2002. Plants from mine spoils in the South American area as potential sources of germplasm for phytoremediation technologies. *Acta Biotechnologica* 22(1-2): 5-11.
7. Cárdenas-Pérez, S., A. Piernik, A. Ludwiczak, M. Duszyn, A. Szmidi-Jaworska y J.J. Chanona-Pérez. 2020. Image and fractal analysis as a tool for evaluating salinity growth response between two *Salicornia europaea* populations. *BMC Plant Biology* 20:467.
8. Chaudhry, S. y G.P.S. Sidhu. 2022. Climate change regulated abiotic stress mechanisms in plants: a comprehensive review. *Plant Cell Report* 41: 1-31.
9. Chen, B., J. Zhou, X. Gou, D.W. Ma, Y.N. Wang, Z.L. Hu y Y.Q. He. 2016. Volatiles from *Chenopodium ambrosioides* L. induce the oxidative damage in maize (*Zea mays* L.) radicles. *Allelopath Journal* 38: 171-181.
10. Chen, B., Y.N. Wang, D.W. Ma, Z.L. Hu, Y.Q. He y J. Zhou. 2015. Allelopathic effects of *Chenopodium ambrosioides* L. on antioxidant enzyme activity and gene expression in maize root. *Ecology and Environmental Sciences* 24: 1640-1646.
11. Cruz-Falcón, A., J.M. Murillo-Jiménez y H.C. Fraga-Palomino. 2023. Evolución de la intrusión marina y relaciones iónicas en el acuífero de La Paz BCS, México. *Terra Latinoamericana* 41:1-16. e1636.
12. García, E. 2004. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen. Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F. 74 p.
13. Goto, K., S. Yabuta, P. Ssenyonga, S. Tamaru y J.I. Sakagami. 2021. Response of leaf water potential, stomatal conductance and chlorophyll content under different levels of soil water, air vapor pressure deficit and solar radiation in chili pepper (*Capsicum chinense*). *Scientia Horticulturae* 281: 109943,
14. Hameed, A., M.Z. Ahmed, T. Hussain, I. Aziz, N. Ahmad, B. Gul y B.L. Nielsen. 2021. Effects of salinity stress on chloroplast structure and function. *Cells* 10(8).
15. Hu, Z.L., Y.N. Wang, D.W. Ma, B. Chen, Y.Q. He y J. Zhou. 2015. The alleviate effect of extracellular DNA and protein in maize root border cells on the allelochemical stress from *Chenopodium ambrosioides* L. *Scientia Agricultura Sinica* 48: 1962-1970.

16. Kotula, L., P. García Caparros, C. Zörb, T.D. Colmer y T.J. Flowers. 2020. Improving crop salt tolerance using transgenic approaches: An update and physiological analysis. *Plant Cell and Environment*. 43: 2932-2956.
17. Ilangumaran, G. y D.L. Smith. 2017. Plant growth promoting rhizobacteria in amelioration of salinity stress: A systems biology perspective. *Frontiers in Plant Science* 8: 1768.
18. Kasali, F.M., J. Tusiimire, J.N. Kadima y Amon Ganafa Agaba. 2021. Ethnomedical uses, chemical constituents, and evidence-based pharmacological properties of *Chenopodium ambrosioides* L.: extensive overview. *Future Journal of Pharmaceutical Sciences* 7: 153.
19. Ma, Y., M.C. Dias y H. Freitas. 2020. Drought and salinity stress responses and microbe-induced tolerance in plants. *Frontiers in Plant Science* 11: 591911.
20. Meguekam, T.L., D.P. Moualeu, V.D. Taffouo y H. Stützel. 2021. Changes in plant growth, leaf relative water content and physiological traits in response to salt stress in peanut (*Arachis hypogaea* L.) varieties. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca* 49(1): 12049.
21. Muhammad, I., A. Shalmani, M. Ali, Q.H. Yang, H. Ahmad y F.B. Li. 2021. Mechanisms regulating the dynamics of photosynthesis under abiotic stresses. *Frontiers in Plant Science* 11: 615942.
22. Oliveira-Tintino, C.D.M., S.R. Tintino, P.W. Limaverde, F.G. Figueredo, F.F. Campina, F.A.B. Da Cunha et al. 2018. Inhibition of the essential oil from *Chenopodium ambrosioides* L. and α -terpinene on the NorA efflux-pump of *Staphylococcus aureus*. *Food Chemistry* 262: 72-77.
23. Parvin, S., A. Reza, S. Das, M.M.U. Miah y S. Karim. 2023. Potential role and international trade of medicinal and aromatic plants in the world. *European Journal of Agriculture and Food Sciences* 5(5):89-99.
24. Rosales-Nieblas, A., F. Ruiz-Espinoza, B. Murillo-Amador, S. Zamora-Salgado, F. Beltrán Morales y J. Loya Ramírez. 2019. Contenido de clorofila a y b en plantas de epazote (*Chenopodium ambrosioides* L.) sometidas a concentraciones de cloruro de sodio en hidroponía. *Compendio Científico en Ciencias Agrícolas y Biotecnología* 2: 117-121.
25. Samperio, R.G. 1997. *Hidroponía Básica*. Editorial Diana. México, D.F. 176 p.
26. Sangoquiza-Caiza, C.A., Y. Viera-Tamayo, CF. Yáñez-Guzmán y J.L. Zambrano-Mendoza. 2021. Efecto del estrés salino sobre el crecimiento de plántulas de maíz variedad "Tayuyo" en condiciones *in vitro*. *Centro Agrícola* 48(2): 14-23.
27. Santiago-Sáenz, Y.O., A.D. Hernández-Fuentes, C.U. López-Palestina, J.H. Garrido-Cauich, J.M. Alatorre-Cruz y R. Monroy-Torres. 2019. Importancia nutricional y actividad biológica de los compuestos bioactivos de quelites consumidos en México. *Revista Chilena de Nutrición* 46(5): 593-605.
28. Sarabi, B., C. Fresneau, N. Ghaderi, S. Bolandnazar, P. Streb, F.W. Badeck et al. 2019. Stomatal and non-stomatal limitations are responsible in down-regulation of photosynthesis in melon plants grown under the saline condition: Application of carbon isotope discrimination as a reliable proxy. *Plant Physiology and Biochemistry* 141: 1-19.
29. Shabala, L., A. Mackay, Y. Tian, S.E. Jacobsen, D. Zhou y S. Shabala. 2012. Oxidative stress protection and stomatal patterning as components of salinity tolerance mechanism in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Physiologia Plantarum* 146(1): 26-38.
30. Shahid, M.A., A. Sarkhosh, N. Khan, R.M. Balal, S. Ali, L. Rossi, C. Gómez, N. Mattson, W. Nasim and F. Garcia-Sanchez. 2020. Insights into the physiological and biochemical impacts of salt stress on plant growth and development. *Agronomy* 10: 938.
31. SIAP. Sistema de Información Agropecuaria. 2023. Sistema de Información Agropecuaria de Consulta. SAGARPA. México. <http://www.nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
32. Tanveer, M. y A.N. Shah. 2017. An insight into salt stress tolerance mechanisms of

- Chenopodium album*. Environmental Science and Pollution Research 24: 16531-16535.
33. Terrazas-Rueda, J.M. 2019. Aprovechamiento del suelo salino: agricultura salina y recuperación de suelos. *Apthapi* 5(1): 1539-1563.
34. Ungar, I.A. 1995. Seed germination and seed-bank ecology in halophytes. In: Kigel J. and Galili G. (Eds): Seed development and germination, 599-628. Marcel Dekker Inc. New York.
35. Yaish, M.W. y P.P. Kumar. 2015. Salt tolerance research in date palm tree (*Phoenix dactylifera* L.), past, present, and future perspectives. *Frontiers in Plant Science* 6: 1-5. 348.
36. Yamasaki, S. y L.R. Dillenburg. 1999. Measurement of leaf relative water content in *Araucaria angustifolia*. *Revista Brasileira de Fisiología Vegetal* 11: 69-75.
37. Yang, Z., J.L. Li, L.N. Liu, Q. Xie y N. Sui. 2020. Photosynthetic regulation under salt stress and salt-tolerance mechanism of sweet sorghum. *Frontiers in Plant Science* 10: 1722.
38. Zavala, R., J. Herrera, A.S. Lara y V.D.L. Garzón-Cortés. 2016. Evaluación de la toxicidad aguda de un extracto alcohólico de hojas de epazote (*Chenopodium ambrosioides*). *Spei Domus* 12(24).
39. Zhang, Y., E. Kaiser, Y. Zhang, Q. Yang y T. Li. 2018. Short-term salt stress strongly affects dynamic photosynthesis, but not steady-state photosynthesis, in tomato (*Solanum lycopersicum*). *Environmental and Experimental Botany* 149: 109-119.

