

Plasticidad fenotípica de plántulas de *Anacardium occidentale* L. al estrés salino en base a indicadores fisiológicos
Phenotypic plasticity of *Anacardium occidentale* L. seedlings exposed to salt stress based on physiological indicators

Jeiner Medina-Leyva¹ , Bettina Eichler-Löbermann² ,
Raúl Campos-Posada³ , Gloria Campos-Posada³ , Raúl Carlos López-Sánchez¹ ,
Adalberto Benavides-Mendoza⁵ y Luis A. Rodríguez-Larramendi^{4*}

¹ Universidad de Granma. Carretera Bayamo-Manzanillo km 17.5, Peralejo. 85149 Bayamo, Granma, Cuba.

² University of Rostock, Agronomy and Crop Science. Justus-von-Liebig-Weg 6. 18051 Rostock, Germany.

³ Universidad Autónoma de Coahuila, FIME. Barranquilla s/n, Colonia Guadalupe. 25730 Monclova, Coahuila, México.

⁴ Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH). Facultad de Ingeniería. Carretera Villa Corzo-Monterrey km 3.0. 30520 Villa Corzo, Chiapas. México.

* Autor para correspondencia (alfredo.rodriguez@unicach.mx)

⁵ Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Departamento de Horticultura. Calzada Antonio Narro 1923, Buenavista. 25315, Saltillo, Coahuila México.

Editor de Sección: Dr. Fabián Fernández Luqueño

RESUMEN

El estudio de la respuesta al estrés salino a partir de indicadores fisiológicos en genotipos de marañón (*Anacardium occidentale* L.), contribuye al conocimiento de los mecanismos adaptativos de esta especie a condiciones estresantes. El objetivo de esta investigación fue analizar la plasticidad fenotípica y la variación en indicadores relacionados con la fotosíntesis en dos genotipos (rojo y amarillo) de *Anacardium occidentale* L., durante la fase de plántulas en condiciones de invernadero. Se evaluó el efecto de cinco niveles de salinidad (0.02 dS m⁻¹, 5 dS m⁻¹, 10 dS m⁻¹, 15 dS m⁻¹ y 20 dS m⁻¹) sobre caracteres asociados a la fotosíntesis, intercambio gaseoso y la fluorescencia de la clorofila. Se calculó la plasticidad fenotípica en respuesta al estrés salino de los indicadores evaluados a través del índice de plasticidad fenotípica. La variedad roja mostró las mayores afectaciones producto del estrés salino en los indicadores tasa fotosintética, transpiración, CO₂ subestomático, Fm, Fv, Fv/Fm, Fv/Fo y Pi abs. Las diferencias significativas encontradas en cuanto a la plasticidad fenotípica mostraron valores superiores en la variedad roja en la mayoría de los indicadores evaluados. Se muestra el efecto negativo que tiene la salinidad en el estadio de plántulas en los indicadores relacionados con la fotosíntesis, intercambio gaseoso, y fluorescencia de la clorofila, así como las diferencias significativas existentes en cuanto a los indicadores evaluados y los niveles de plasticidad fenotípica de los mismos entre genotipos. La fotosíntesis y la conductancia estomática fueron los indicadores que mostraron los mayores valores de plasticidad fenotípica.

Palabras clave: marañón, salinidad, plasticidad.

SUMMARY

The study of cashew (*Anacardium occidentale* L.) response to salt stress from physiological indicators in genotypes contributes to the knowledge of the adaptive mechanisms of this species to stressful conditions. The objective of our research was to analyze the phenotypic plasticity and variation in indicators related to photosynthesis in two genotypes (red and yellow) of *Anacardium occidentale* L., during the seedling stage under greenhouse conditions. The effect of five salinity levels (0.02 dS m⁻¹, 5 dS m⁻¹, 10 dS m⁻¹, 15 dS m⁻¹ and 20 dS m⁻¹) on characters associated with photosynthesis, gas exchange and chlorophyll fluorescence was evaluated. Phenotypic plasticity in response to salt stress was calculated for the indicators evaluated through the



Cita recomendada:

Medina-Leyva, J., Eichler-Löbermann, B., Campos-Posada, R., Campos-Posada, G., López-Sánchez, R. C., Benavides-Mendoza, A., & Rodríguez-Larramendi, L. A. (2023). Plasticidad fenotípica de plántulas de *Anacardium occidentale* L. al estrés salino en base a indicadores fisiológicos. *Terra Latinoamericana*, 41, 1-11. e1556. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1556>

Recibido: 5 de abril de 2022.
Aceptado: 2 de febrero de 2023.
Artículo. Volumen 41.
Junio de 2023.

phenotypic plasticity index. The red variety showed the greatest effects of salt stress on photosynthetic rate, transpiration, sub-stomatal CO₂, Fm, Fv, Fv/Fm, Fv/Fo, and Pi abs. The significant differences found in phenotypic plasticity showed higher values in the red variety in most of the indicators evaluated. A negative effect of salinity at the seedling stage on indicators related to photosynthesis, gas exchange, and chlorophyll fluorescence was detected, as well as significant differences between genotypes according to the indicators evaluated and the levels of phenotypic plasticity. Photosynthesis and stomatal conductance were the indicators that showed the highest values of phenotypic plasticity.

Index words: cashew, salinity, plasticity.

INTRODUCCIÓN

El marañón (*Anacardium occidentale* L.) es un árbol tropical de la familia *Anacardiaceae*, originario de la región norte de Brasil. En Cuba, esta especie encontró condiciones edafoclimáticas favorables para su crecimiento y desarrollo en suelos empobrecidos y semiáridos, donde prácticamente no sobrevive otro frutal. El marañón se ha empleado en programas de rehabilitación de suelos dedicados anteriormente a la actividad minera, en suelos ferríticos, típicos de la región de Moa, en el oriente de Cuba (Hernández, Izquierdo, Caravaca, y Roldán, 2007).

Anacardium occidentale L. se encuentra en la lista de frutales tropicales arbóreas amenazadas en Cuba desde hace 26 años, por lo que se necesitan tomar medidas urgentes de conservación y manejo de las poblaciones silvestres que habitan en los campos y sabanas; las cuales están dispersos y se encuentran cercanos al declive fisiológico, lo que significa la pérdida por parte de la planta de su capacidad de realizar sus funciones vitales (Nerdo-Rodríguez, Guedes, Guede, Aguilera y Borges, 2003).

Por otra parte, el establecimiento de las plántulas es un proceso crítico para la productividad de los cultivos, especialmente en condiciones adversas. El estrés salino es una de las perturbaciones ambientales que afecta más la germinación de las semillas, el establecimiento y el crecimiento de las plántulas (Voigt *et al.*, 2009).

La salinidad afecta la producción de cultivos y la sostenibilidad agrícola en las regiones áridas y semiáridas del mundo. Cuba no es la excepción, se ha informado que tiene alrededor de un millón de hectáreas con algún grado de salinización; específicamente el Valle del río Cauto, ubicado en la región oriental del país, tiene 228 000 hectáreas afectadas por la salinidad (López-Sánchez, Eichler, Campos, Campos y Gomez, 2019). En estas áreas el rendimiento de los cultivos ha disminuido, incluso algunas plantaciones han sido abandonadas por la pérdida de capacidad de las plantas para crecer en estos ambientes (López-Sánchez, Eichler, Campos, Campos y Gomez, 2020).

La tolerancia a la salinidad en las plantas es un fenómeno complejo que involucra cambios morfológicos y de desarrollo, así como procesos fisiológicos y bioquímicos. La salinidad interrumpe la función celular a través de los efectos tóxicos de iones específicos y por efectos osmóticos, o ambos (Munns, 2005).

La especie *Anacardium occidentale* L. ha desarrollado varios mecanismos de adaptación genética y fisiológica para superar condiciones de estrés ambiental (Silveira *et al.*, 2003). En tal sentido se han desarrollado investigaciones con el fin de conocer los efectos del estrés salino en el crecimiento, el metabolismo, las respuesta de las plantas y el tiempo de exposición al estrés. (De Abreu *et al.*, 2008; Alvarez-Pizarro, Gomes, De Lacerda, Alencar y Prisco, 2009; Marques, Freitas, Bezerra, Prisco y Gomes-Filho, 2011; Marques, Freitas, Alencar, Prisco y Gomes-Filho, 2013; Freitas, Marques, Bezerra, Prisco y Gomes-Filho, 2013; De Lima *et al.*, 2020).

La respuesta de esta especie al estrés salino es vital importancia para su establecimiento en áreas afectadas por la salinidad. Las plantas muestran diferentes estrategias de aclimatación al estrés por salinidad, lo que lleva a un conjunto diverso de respuestas morfológicas y fisiológicas (Li, Wan, Zhou, Yang y Qin, 2010).

Aunque es amplio en conocimiento en la temática, no existen referencias de la plasticidad fenotípica de esta especie en respuesta al estrés salino. Por lo tanto, el objetivo de esta investigación fue analizar la plasticidad fenotípica y la variación en indicadores relacionados con la fotosíntesis en dos poblaciones de *Anacardium occidentale* L. durante la etapa de plántulas en condiciones de invernadero.

MATERIALES Y MÉTODOS

Semillas de marañón (*Anacardium occidentale* L.) de las variedades roja y amarilla, provenientes de plantaciones naturales ubicadas en la localidad de Peralejo, (20° 16' 59.129" N 76° 40' 59.778" O) en Cuba, fueron desinfectadas por 10 min con hipoclorito de sodio al 5% (v/v) y lavadas con agua destilada. Las semillas fueron puestas a germinar en arena de río previamente lavada y esterilizada. Después de 30 días de la emergencia de las plántulas, se seleccionaron las que mostraron altura y diámetro similar y fueron transferidas a macetas plásticas conteniendo 5 kg de suelo. El suelo empleado (Cambisol) mostró valores medios de pH de 7.5, de materia orgánica 3.5%, contenido bajo de fósforo asimilable para las plantas (P_2O_5 : 0.45 mg 100 g⁻¹) y potasio (K_2O : 4.40 mg 100 g⁻¹) (extraído en 0.5 m de ácido sulfúrico). Las mismas fueron irrigadas con solución salina con cinco concentraciones de NaCl (Control, 5, 10, 15, 20 dS m⁻¹) ajustadas con un conductímetro portátil (HANNA. HI 9033, Rumania). Durante los dos primeros meses, las plántulas se irrigaron con agua del grifo sin NaCl para lograr un crecimiento adecuado. Luego, las plántulas se sometieron a salinización mediante la adición de NaCl hasta alcanzar los niveles de salinidad predeterminados para cada tratamiento.

Para evitar el choque osmótico y por tanto provocar en la planta el efecto de estrés salino y no el choque salino, se procedió a salinizar gradualmente el suelo de las macetas aumentando la concentración cada 3 días durante 12 semanas. Las macetas se lixiviaron con agua del grifo cada semana para reducir la acumulación de sal. Inmediatamente después de cada lixiviación se añadió solución salina fresca para mantener constante la concentración de NaCl en el suelo. La salinidad fue monitoreada semanalmente por el método de estimación de salinidad, utilizando un conductímetro portátil (HANNA. HI 9033, Rumania). El experimento se llevó a cabo durante cinco meses a una temperatura ambiente de 25-36 °C con un período de exposición a la luz solar de aproximadamente 12 horas diarias. Las plántulas se recolectaron después de haber crecido en condiciones de estrés salino durante tres meses.

El experimento se planteó como un diseño completamente aleatorizado 2×5 con arreglo bifactorial, compuesto por dos variedades de marañón (Rojo y Amarillo) y cinco niveles de salinidad (0.02, 5, 10, 15 y 20 dS m⁻¹). En total, se compararon diez tratamientos con diez repeticiones por tratamiento, para un total de 100 unidades experimentales.

Variables Evaluadas

Intercambio de Gases

La tasa fotosintética (A), la tasa de transpiración (E), la conductancia estomática (gs) y el CO₂ subestomático (Ci) se midieron de forma no destructiva con un analizador de intercambio de gases (ADC BioScientific, LCpro-SD, Reino Unido). El intercambio de gases se midió desde las 9:00 am hasta las 11:00 am, GMT-4. Para las mediciones se utilizó la cuarta hoja completamente expandida de cada planta (diez plantas por tratamiento, n = 10). Los parámetros de fotosíntesis, intercambio de gases y fluorescencia de clorofila se midieron a 35.5 °C, una humedad relativa del 79%, concentración de CO₂ de 414.54 mg L⁻¹ y una irradiación fotosintética activa de 1 950 μmol m⁻² s⁻¹.

Fluorescencia de la Clorofila

La fluorescencia inicial (F_0), la fluorescencia máxima (F_m), la eficiencia cuántica máxima del fotosistema II (F_v/F_m), la relación de fluorescencia variable frente a la fluorescencia inicial (F_v/F_0) y el índice de potencial fotosintético (PIabs) se midieron con un fluorímetro de clorofila portátil (Hansatech Instruments, RS232, Reino Unido). Para las mediciones se utilizó la cuarta hoja completamente expandida de cada planta (diez plantas por tratamiento, $n = 10$). Antes de medir, las hojas se adaptaron a la oscuridad durante 30 min utilizando los clips proporcionados con el kit. Después de someter las hojas a la oscuridad, se registró el F_0 y un pulso de saturación de radiación ($3500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ con la ayuda de tres diodos emisores de luz de 650 nm) (de 10 μs a 1 s) para determinar F_m . Los datos obtenidos de F_0 , F_m y F_v permitieron determinar el rendimiento cuántico máximo del fotosistema II (F_v/F_m) e índice de potencial fotosintético (PI abs).

Índice de Plasticidad Fenotípica

Se calculó el Índice de Plasticidad Fenotípica (IPF) para los caracteres evaluados mediante la siguiente ecuación:

$$\text{IPF} = (\text{Max} - \text{Min}) / \text{Max} \quad (1)$$

Donde Max y Min representan las medias de los valores máximos y mínimos de cada parámetro evaluado por separado respectivamente (Valladares, Martínez, Balaguer, Pérez y Manrique, 2000).

Análisis Estadístico

Se realizaron análisis de varianza, previa aplicación de las pruebas de normalidad de Kolmogorov-Smirnov y Shapiro Wilk y la prueba de homogeneidad de varianzas de Levene y Bartlett para comprobar los supuestos del ANOVA. Los valores medios se compararon al nivel del 5% mediante la prueba de Tukey (Conover, 1999).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Fotosíntesis e Intercambio Gaseoso

El estrés salino tuvo un efecto negativo en los indicadores fotosintéticos y de intercambio gaseoso en plántulas de *Anacardium occidentale* L. Se observaron diferencias significativas ($P \leq 0.05$) en todos los tratamientos debido al incremento de los niveles de salinidad. Las variedades y los niveles de salinidad tuvieron influencia significativa en todas las variables analizadas, en tanto la interacción variedad y salinidad no mostró significación para el indicador conductancia estomática (Cuadro 1).

La expresión fenotípica de los indicadores evaluados muestra el daño producido por la salinidad y las diferencias existentes entre las variedades estudiadas. La variedad roja mostró las mayores afectaciones (47, 52 y 80%) en los indicadores C_i , E y A . En tanto la variedad amarilla muestra mayores afectaciones (52%) en G_s respectivamente (Cuadro 1).

El efecto negativo de estrés salino en los indicadores relacionados con la fotosíntesis y el intercambio gaseoso pudiera estar causado por el efecto osmótico de la salinidad presente en el suelo, la cual afecta la absorción radical del agua, la reducción de la apertura estomática como mecanismo para evitar la pérdida de agua, lo que trae consigo la disminución de la transpiración y la tasa fotosintética.

Cuadro 1. Efecto de las variedades y la salinidad en el CO₂ subestomático (Ci), la transpiración (E), la conductancia estomática (gs) y tasa fotosintética (A) en hojas de *Anacardium occidentale* L.
Table 1. Effect of varieties and salinity on sub-stomatal CO₂ (Ci), transpiration (E), stomatal conductance (gs) and photosynthetic rate (A) in leaves of *Anacardium occidentale* L.

Variedades	Niveles de salinidad	Ci	E	Gs	A
		vim	----- mol m ⁻² s ⁻¹ -----		μmol m ⁻² s ⁻¹
Roja	Control	405.4 ± 12.6 a	0.72 ± 0.04 d	0.03 ± 0.001 c	1.64 ± 0.04 a
	5	357.7 ± 11.8 c	0.56 ± 0.05 e	0.03 ± 0.001 c	0.52 ± 0.02 b
	10	344.7 ± 9.65 c	0.59 ± 0.03 e	0.02 ± 0.002 c	0.48 ± 0.02 c
	15	319.2 ± 14.2 d	0.44 ± 0.04 fg	0.02 ± 0.006 c	0.43 ± 0.01 c
	20	312.3 ± 35.8 d	0.35 ± 0.08 g	0.01 ± 0.001 cd	0.33 ± 0.02 d
Amarilla	Control	382.7 ± 23.8 b	1.66 ± 0.06 a	0.08 ± 0.001 a	1.74 ± 0.02 a
	5	358.9 ± 78.3 c	1.23 ± 0.04 b	0.05 ± 0.005 b	0.66 ± 0.01 b
	10	358.9 ± 53.1 c	1.20 ± 0.06 b	0.03 ± 0.002 c	0.59 ± 0.02 b
	15	348.1 ± 64.2 c	0.94 ± 0.03 c	0.03 ± 0.004 c	0.47 ± 0.01 c
	20	332.5 ± 45.2 cd	0.82 ± 0.08 cd	0.03 ± 0.005 c	0.41 ± 0.02 c
Variedad		S	S	S	S
Salinidad		S	S	S	S
Variedad x Salinidad		S	S	NS	S

S = significativa a $P \leq 0.05$; NS, no significativo. Letras diferentes entre columnas indican diferencias significativas para $P \leq 0.05$.
 S = significant at $P \leq 0.05$; NS, not significant. Different letters between columns indicate significant differences for $P \leq 0.05$.

Los resultados coinciden con los obtenidos por Alencar *et al.* (2021), los cuales reportan las reducciones que se producen en la conductancia estomática, la fotosíntesis neta y la transpiración en dos clones de marañón a medida que se incrementan los niveles de salinidad e incluso señala las diferencias presentes entre clones en su respuesta al estrés salino.

Para el indicador CO₂ subestomático, se observa una disminución estadísticamente significativa de los valores a medida que aumentan los niveles de salinidad en ambas variedades en comparación con el control.

Mientras que la tasa de transpiración y la conductancia estomática la disminución fue significativamente mayor en la variedad amarilla frente al primer nivel de salinidad estudiado; sin embargo, en la variedad roja no existieron diferencias significativas para la conductancia estomática y aunque los valores disminuyen significativamente para la transpiración a medida que se incrementa el estrés salino el comportamiento fue más estable.

En condiciones de salinidad, el intercambio de gases se ve afectado principalmente como consecuencia de la alteración de la fisiología y la bioquímica de los estomas, así como también debido a los efectos de las sales en los eventos fotoquímicos (Taiz y Zeiger, 2002)

De igual manera, Souza *et al.* (2019) reportaron que la salinidad provoca una disminución significativa en conductancia estomática, en la tasa de transpiración y en la concentración de CO₂ intercelular en plantas de marañón expuestas a alto niveles de salinidad.

Por otra parte, resultó más sensible la tasa fotosintética, observándose una brusca disminución de los valores en ambas variedades frente a la presencia de 5 dS m⁻¹ de NaCl, no obstante, para el resto de los niveles muestra la misma tendencia que el resto de los indicadores (Cuadro 1).

La reducción de la fotosíntesis bajo estrés salino puede ser consecuencia de la disminución de la turgencia, la retroinhibición de la enzima RUBISCO del ciclo de Calvin al producirse un efecto alostérico impidiendo que la enzima ya no pueda unirse a su sustrato y por otra parte la deficiencia de K^+ inducida por Na^+ y los efectos tóxicos de Na^+ y Cl^- (Storey y Walker, 1998), ya que el transporte de electrones en los cloroplastos es relativamente insensible a las sales (Taiz y Zaiger, 2002). Álvarez-Pizarro (2006¹) reportaron los efectos negativos del estrés salino en la fotosíntesis neta, la conductancia estomática y la transpiración en cinco clones de marañón en los primeros estadios de crecimiento. Mientras que, Amorim, Gomes-Filho, Bezerra, Prisco y de Lacerda (2010) estudiando el efecto de la salinidad en plantas adultas de *Anacardium occidentale* L. reportaron que la fotosíntesis neta, transpiración y conductancia estomática no variaron significativamente en función de los diferentes niveles de salinidad en el agua de riego, no obstante, la transpiración y la conductancia estomática si variaron en función de los tiempos de medición y concluyen que las afectaciones por la salinidad en plantas de marañón pueden diferir según la edad del cultivo.

Kozlowski (1997) señala que las plantas leñosas suelen mostrar una mayor tolerancia a las sales durante la fase de germinación que durante la fase de establecimiento de plántulas, cuando la sensibilidad a las sales aumenta. Además, estas plantas se vuelven progresivamente más tolerantes a medida que alcanzan la etapa adulta hasta la etapa reproductiva, aunque la salinidad puede tener un efecto negativo durante la floración (antesis).

Fluorescencia de la Clorofila

Al incrementarse los niveles de salinidad se observó el efecto negativo que ejerce sobre los procesos fotoquímicos en plántulas de *Anacardium occidentale* L. Se produce un aumento de los valores de F_o y la disminución de P_i abs, F_m , F_v/F_m y F_v/F_o en las plántulas de las dos variedades estudiadas. Los valores más críticos de las variables evaluadas se observaron en las plántulas de la variedad roja, al mostrar afectaciones máximas en los valores de F_m de un 39%, F_v de 51%, de F_v/F_m de, 16%, F_v/F_o , en 62% y P_i abs de un 84% respectivamente. La variedad, la salinidad y la interacción variedad y salinidad tuvieron una influencia significativa en los parámetros de la fluorescencia de la clorofila evaluados (Cuadro 2).

El comportamiento de ambas variedades de *Anacardium occidentale* L. muestran las diferencias existentes entre el control y los niveles de salinidad utilizados en el experimento, mostrando un comportamiento lineal para ambas variedades. La expresión fenotípica para F_o no resulta tan pronunciada a medida que se incrementan los niveles de salinidad, en tanto para F_m , F_v y F_v/F_m se observa que la variedad roja resultó ser más plástica a los cambios en la concentración de sales, por último, la expresión fenotípica más marcada se observó para F_v/F_o y P_i abs en ambas variedades (Cuadro 2).

El aumento de los valores de F_o en condiciones de estrés salino puede ser consecuencia de un daño en el centro de reacción del PSII o de una reducción en la capacidad de transferencia de energía de excitación desde la antena al centro de reacción. (Baker, 2008).

Según Tatagiba, Moraes, Nascimento y Peloso (2014) y Silva *et al.*, (2006) la reducción de la fluorescencia máxima en presencia del estrés salino, puede ser un indicador de baja eficiencia en la fotorreducción y en el flujo de electrones entre los fotosistemas, lo que da como resultado una baja actividad de PSII en la membrana tilacoidal, lo que influyó directamente en el flujo de electrones entre los fotosistemas.

¹ Álvarez-Pizarro, J. C. (2006). *Caracteres fisiológicos e bioquímicos da tolerancia a salinidade em clones de cajueiro anao-precoce*. Master Thesis como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Bioquímica. Universidade Federal do Ceara. Disponible en: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/18273>

Cuadro 2. Efecto de las variedades y la salinidad en los indicadores de la fluorescencia de la clorofila en hojas de *Anacardium occidentale* L.**Table 2. Effect of varieties and salinity on the content and fluorescence indicators of chlorophyll in leaves of *Anacardium occidentale* L.**

Variedades	Niveles de salinidad	Fo	Fm	Fv	Fv/ Fm	Fv/Fo	Pi abs
Roja	Control	272 ± 23.8 d	1249 ± 58.2 a	991 ± 87.6 b	0.81 ± 0.07 a	4.18 ± 0.2 b	3.2 ± 0.2 c
	5	278 ± 38.1cd	1085 ± 56.1 d	956 ± 87.3 c	0.88 ± 0.04 a	3.53 ± 0.2 d	2.2 ± 0.1 d
	10	280 ± 24.8 c	942 ± 78.2 e	673 ± 81.6 f	0.69 ± 0.04 c	2.42 ± 0.1 de	2.1 ± 0.1 d
	15	293 ± 28.3 b	929 ± 45.2 e	648 ± 64.5 f	0.68 ± 0.07 c	2.3 ± 0.4 e	1.1 ± 0.2e
	20	309 ± 34.2 a	756 ± 46.3 f	483 ± 54.2 g	0.60 ± 0.04 c	1.56 ± 0.8 f	0.5 ± 0.1 f
Amarilla	Control	236 ± 18.5 g	1252 ± 87.3 a	1008 ± 90.5 a	0.82 ± 0.05 a	4.7 ± 0.7 a	3.9 ± 0.5 a
	5	242 ± 14.3 fg	1251 ± 91.2 a	991 ± 87.1 b	0.81 ± 0.03 a	4.18 ± 0.3 b	3.7 ± 0.2b
	10	241 ± 11.9 g	1231 ± 98.5 b	972 ± 96.5 c	0.77 ± 0.04 b	4.03 ± 0.4 c	3.3 ± 0.2 c
	15	249 ± 17.7 ef	1178 ± 92.4 c	929 ± 89.5 d	0.78 ± 0.02 b	3.82 ± 0.7 d	2.5 ± 0.1 d
	20	259 ± 21.5 e	1065 ± 89.5 d	829 ± 87.3 e	0.76 ± 0.08 b	3.53 ± 0.3 d	1.6 ± 0.2 e
Variedad		S	S	S	S	S	S
Salinidad		S	S	S	S	S	S
Variedad × Salinidad		S	S	S	S	S	S

Fo: fluorescencia inicial, Fm: fluorescencia máxima, Fv: fluorescencia variable, Fv/Fm: eficiencia cuántica máxima del fotosistema II, Fv/Fo: relación de fluorescencia variable frente a la fluorescencia inicial, PI abs: índice de rendimiento. S = significativa a $P \leq 0.05$; NS, no significativo. Letras diferentes entre columnas indican diferencias significativas para $P \leq 0.05$.

Fo: Initial fluorescence, Fm: maximum fluorescence, Fv: variable fluorescence, Fv/Fm: maximum quantum efficiency of photosystem II, Fv/Fo: ratio of variable fluorescence versus initial fluorescence, PI abs: performance index. S = significant at $P \leq 0.05$; NS, not significant. Different letters between columns indicate significant differences for $P \leq 0.05$.

De acuerdo a Baker (2008), el incremento del indicador Fv en plantas de marañón en condiciones de salinidad es debido a su mayor capacidad para transferir energía de los electrones expulsados de las moléculas de pigmento a la formación del agente reductor NADPH, ATP y ferredoxina reducida, por lo que aumenta su capacidad de asimilación de CO_2 en la fase bioquímica de la fotosíntesis.

Índice de Plasticidad Fenotípica

Al analizar la plasticidad fenotípica de las variedades a partir de los diferentes indicadores evaluados, se puede observar que existen diferencias significativas en la respuesta de las variedades a los indicadores de fotosíntesis, intercambio gaseoso y la fluorescencia de la clorofila (Figura 1 A y B).

Para los indicadores relacionados con la fotosíntesis Ci y E encontramos los valores más bajos (inferiores a 0.4) de plasticidad fenotípica para las dos variedades en los indicadores Ci y E, mientras que para el indicador Gs este resultó bajo para la variedad roja; ambas variedades obtuvieron valores altos de plasticidad para A. Excepto para Gs la variedad roja fue la que presentó los mayores valores de plasticidad en comparación con la amarilla. Esto puede ser una causa por lo que la variedad amarilla presenta mayor tolerancia a la salinidad, porque disminuye la conductancia estomática como alternativa para mitigar el daño por la salinidad (Figura 1A). Estos resultados coinciden con los obtenidos por Yao et al. (2013) en la especie *Thellungiella salsaginea*.

Los índices de fluorescencia de la clorofila muestra las diferencias fenotípicas marcadas entre los genotipos frente al estrés salino (Figura 1B). Específicamente, los indicadores Fo, Fm, Fv y Fv/Fm presentaron, para ambas variedades, valores bajos de

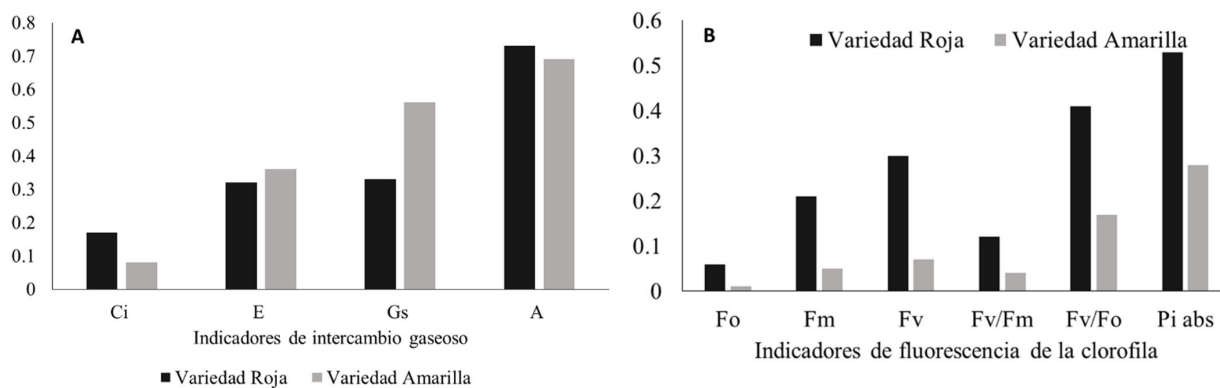


Figura 1. Índice de Plasticidad Fenotípica en respuesta al estrés salino en plántulas de dos variedades de *A. occidentale* L. en los caracteres de la fotosíntesis e intercambio gaseoso (a) fluorescencia de la clorofila (b). Gs: conductancia estomática, A: tasa fotosintética, E: transpiración, Ci: CO₂ subestomático, Fo: fluorescencia inicial, Fm: fluorescencia máxima, Fv: fluorescencia variable, Fv/Fm: eficiencia cuántica máxima del fotosistema II, Fv/Fo: relación de fluorescencia variable frente a la fluorescencia inicial, Pi abs: índice de rendimiento. Letras distintas difieren significativamente para $P \leq 0.05$ por la prueba de T de Students (Figuras a y b) entre genotipos.

Figure 1. Phenotypic Plasticity Index in response to salt stress in seedlings of two varieties of *A. occidentale* in photosynthesis and gas exchange (a), and chlorophyll fluorescence (b). Gs: stomatal conductance, A: photosynthetic rate, E: transpiration, Ci: sub-stomatal CO₂, Fo: initial fluorescence, Fm: maximum fluorescence, Fv: variable fluorescence, Fv/Fm: maximum quantum efficiency of photosystem II, Fv/Fo: ratio of variable fluorescence versus initial fluorescence, Pi abs: Performance index. Different letters indicate statistical differences for $P \leq 0.05$ by Students' T test (a and b) Duncan's Multiple Ranges (c).

plasticidad. No obstante, para Fv/Fo y Pi abs resulta interesante que solo la variedad roja presentó valores altos y de igual manera para el resto de los indicadores de manera significativa en comparación con la variedad amarilla (Figura 1B).

De manera general los indicadores estudiados relacionados con la fluorescencia de la clorofila fueron menos plásticos, lo cual sugiere que las plantas de ambas variedades fueron capaces de equilibrar sus procesos fotosintéticos para lograr su funcionamiento en condiciones de estrés salino, coincidiendo con lo reportado por Guo *et al.* (2018) en las especies arbustivas *Robinia pseudoacacia* y *Amorpha fruticosa* creciendo en diferentes niveles de salinidad y sugiere este comportamiento a una cierta tolerancia del aparato fotoquímico al NaCl. Al parecer la baja plasticidad en la mayoría de los indicadores evaluados es lo que provoca la reducción significativa de la fotosíntesis. Las respuestas al estrés salino de los indicadores evaluados muestran un comportamiento particular, mostrando primero una rápida disminución y posteriormente los cambios no son tan bruscos a medida que se incrementan los niveles de salinidad, lo que repercute negativamente en los valores de fotosíntesis.

Esto pudiera ser parte de la explicación desde el punto de vista fisiológico de la baja tolerancia a la salinidad de esta especie en estos estadios, lo que coincide con algunos estudios realizados en anacardos en etapas tempranas de desarrollo y que hacen referencia al efecto tóxico y limitante de la salinidad (Álvarez-Pizarro, 2006¹; Viégas, da Silveira, Lima-Junior, Queiroz y Fausto, 2001), mientras que Amorim *et al.* (2010) señalaron que en plantaciones establecidas el estrés salino no fue suficiente para provocar cambios significativos en el desarrollo y productividad de las plantas estudiadas.

Otro aspecto a destacar es la alta plasticidad de la conductancia estomática y la fotosíntesis, y la baja plasticidad de la concentración de CO₂ subestomático, según Kozłowski (1997), factores no asociados a los estomas están involucrados en la reducción de la tasa fotosintética, entre los que se encuentra la alta acumulación de iones en las hojas, causando daños al sistema foto-receptor y a las enzimas que participan en el proceso fotosintético.

Resulta necesario estudiar otros indicadores morfológicos y de acumulación de iones para dilucidar mejor las respuestas de esta especie al estrés salino, de igual manera evaluar en lo posible un mayor número de variedades para la búsqueda de genotipos más tolerantes.

CONCLUSIONES

En las condiciones experimentales que se desarrolló este trabajo se muestra el efecto negativo que tiene la salinidad en el estadio de plántulas en los indicadores relacionados con la fotosíntesis, intercambio gaseoso y fluorescencia de la clorofila en las dos variedades de *Anacardium occidentale* L.

Se encontraron diferencias significativas en los indicadores relacionados con la fotosíntesis y la fluorescencia de la clorofila, y los índices de plasticidad fenotípica de los mismos entre las dos variedades de *Anacardium occidentale* L. estudiadas.

La fotosíntesis y la conductancia estomática fueron los indicadores que mostraron los mayores valores de plasticidad fenotípica.

Desde el punto de vista práctico resulta importante conocer el comportamiento de diferentes genotipos de marañón y los cambios adaptativos al enfrentarse al estrés salino para la evaluación de estrategias de reforestación de áreas afectadas por la salinidad.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los conjuntos de datos generados o analizados durante el estudio actual no están disponibles públicamente debido [a regulaciones institucionales] pero están disponibles del autor correspondiente a solicitud razonable.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

FONDOS

No aplicable.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: R.L.S. y L.R.L. Metodología: R.L.S. Software: J..M.L. Validación: B.E.L., R.C.P. y G.C.P. Análisis formal: R.L.S y J.M.L. Investigación: R.L.S. Recursos: R.L.S. Escritura: preparación del borrador original: R.L.S., B.E.L. y L.R.L. Escritura, revisión y edición: R.L.S. y L.R.L.

AGRADECIMIENTOS

A la Agencia Alemana de Intercambio Académico (DAAD) por el financiamiento para realizar esta investigación.

LITERATURA CITADA

- Alencar, N. L., De Oliveira, A. B., Alvarez-Pizarro, J. C., Marques, E. C., Prisco, J. T., & Gomes-Filho, E. (2021). Differential responses of dwarf cashew clones to salinity are associated to osmotic adjustment mechanisms and enzymatic antioxidative defense. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 93(1), 1-14. <https://doi.org/10.1590/0001-3765202120180534>
- Alvarez-Pizarro, J. C., Gomes-Filho, E., De Lacerda, C. F., Alencar, N. L., & Prisco, J. T. (2009). Salt-induced changes on H⁺-ATPase activity, sterol and phospholipid content and lipid peroxidation of root plasma membrane from dwarf-cashew (*Anacardium occidentale* L.) seedlings. *Plant Growth Regulation*, 59(2), 125-135.
- Amorim, A. V., Gomes Filho, E., Bezerra, M. A., Prisco, J. T., & de Lacerda, C. F. (2010). Physiologic responses of precocious dwarf cashew at different levels of salinity. *Revista Ciência Agronômica*, 41(1), 113-121.
- Baker, N. R. (2008). Chlorophyll fluorescence: A probe of photosynthesis in vivo. *Annual Review of Plant Biology*, 59, 89-113. <http://dx.doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092759>
- Conover, W. J. (1999). *Practical nonparametric statistical* (3^{ra} ed). New York, NY, USA: John Wiley & Sons. ISBN: 0-471-16068-7
- De Abreu, C. E., Prisco, J. T., Nogueira, A. R., Bezerra, M. A., Lacerda, C. F. D., & Gomes-Filho, E. (2008). Physiological and biochemical changes occurring in dwarf-cashew seedlings subjected to salt stress. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 20(2), 105-118. <https://doi.org/10.1590/S1677-04202008000200003>
- De Lima, G., Da Silva, J., Souza, L., Nobre, R., Soares, L. A., & Gheyi, H. (2020). Tolerance of precocious dwarf cashew clones to salt stress during rootstock formation stage. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 24(7), 474-481. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v24n7p474-481>
- Freitas, V. S., Marques, E. C., Bezerra, M. A., Prisco, J. T., & Gomes-Filho, E. (2013). Growth and ion accumulation in dwarf cashew plants at different times of salinity exposure. *Semina: Ciências Agrárias, Londrina*, 34(6), 3341-3352.
- Guo, X., Ren, X. H., Eller, F., Li, M. Y., Wang, R. Q., Du, N., & Guo, W. H. (2018). Higher phenotypic plasticity does not confer higher salt resistance to *Robinia pseudoacacia* than *Amorpha fruticosa*. *Acta Physiologiae Plantarum*, 40, 1-14.
- Hernández, G., Izquierdo, I., Caravaca, F., & Roldán, A. (2007). Carbon capture in the soil and rehabilitation of areas degraded by mining in Moa. *Acta Botánica Cubana*, 19(6), 1-4.
- Kozłowski, T. T. (1997). Responses of woody plants to flooding and salinity. *Tree Physiology*, 17(7), 1-29. <https://doi.org/10.1093/treephys/17.7.490>
- Li, G., Wan, S., Zhou, J., Yang, Z., & Qin, P. (2010). Leaf chlorophyll fluorescence, hyperspectral reflectance, pigments content, malondialdehyde and proline accumulation responses of castor bean (*Ricinus communis* L.) seedlings to salt stress levels. *Industrial Crops and Products*, 31(1), 13-19. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2009.07.015>
- López-Sánchez, R. C., Eichler-Löbermann, B., Campos-Posada, R., Campos-Posada, G., & Gomez-Padilla, E. (2019). Selection of effectiveness of rhizobia nodulating *Macropitillium atropurpureum* under salt stress. *Livestock Research for Rural Development*, 31, e26.
- López-Sánchez, R. C., Eichler-Löbermann, B., Campos-Posada, R., Campos-Posada, G., & Gomez-Padilla, E. (2020). Respuesta de combinaciones rizobio - *Sesbania rostrata* en condiciones de estrés salino en el Valle del Cauto en Cuba. *Livestock Research for Rural Development*, 32(3), e48.
- Marques, E., Freitas, V., Bezerra, M., Prisco, J., & Gomes-Filho, E. (2011). Efeitos do estresse salino na germinação, emergência e estabelecimento da plântula de cajueiro anão precoce. *Revista Ciência Agronômica*, 42(4), 993-999. <https://doi.org/10.1590/S1806-66902011000400023>
- Marques, E. C., Freitas, P. A. F., Alencar, N. L. M., Prisco, J. T., & Gomes-Filho, E. (2013). Increased Na⁺ and Cl⁻ accumulation induced by NaCl salinity inhibits cotyledonary reserve mobilization and alters the source-sink relationship in establishing dwarf cashews seedlings. *Acta Physiologiae Plantarum*, 35(7), 2171-2182. <https://doi.org/10.1007/s11738-013-1254-5>
- Munns, R. (2005). Genes and salt tolerance: bringing them together. *New Phytologist*, 167, 645-663. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2005.01487.x>
- Nerdo-Rodríguez, N., Guedes, L., Guede-Salamanca, A., Aguilera-Marín, N., & Borges, M. (2003). Cultivo in vitro de embriones zigóticos de *Anacardium occidentale* L. *Alimentaria: Revista de Tecnología e Higiene de los Alimentos*, 345, 111-115.
- Silva, M. M. P. D., Vasquez, H. M., Bressan-Smith, R., Silva, J. F. C. D., Erbesdobler, E. D. A., & Andrade-Junior, P. S. C. D. (2006). Eficiência fotoquímica de gramíneas forrageiras tropicais submetidas à deficiência hídrica. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 35, 67-74.
- Silveira, J. A. G., de Almeida-Viégas, R., da Rocha, I. M. A., Moreira, A. C. D. O. M., de Azevedo-Moreira, R., & Oliveira, J. T. A. (2003). Proline accumulation and glutamine synthetase activity are increased by salt-induced proteolysis in cashew leaves. *Journal of plant physiology*, 160(2), 115-123. <https://doi.org/10.1078/0176-1617-00890>
- Souza, N. C. S., Silveira, J. A. G., Silva, E. N., Lima-Neto, M. C., Lima, C. S., Aragão, R. M., & Ferreira-Silva, S. L. (2019). High CO₂ favors ionic homeostasis, photoprotection, and lower photorespiration in salt-stressed cashew plants. *Acta Physiologiae Plantarum*, 41, 1-14.
- Storey, R., & Walker, R. R. (1998). Citrus and salinity. *Scientia Horticulturae*, 78, (1-4), 39-81. [https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(98\)00190-3](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(98)00190-3)
- Taiz, L., & Zeiger, E. (2002). *Fisiologia vegetal*. Sunderland, MA, USA: Sinauer Associates. ISBN: 978-84-8021-601-2

- Tatagiba, S. D., Moraes, G. A. B. K., Nascimento, K. J. T., & Peloso, A. F. (2014). Limitações fotossintéticas em folhas de plantas de tomateiro submetidas a crescentes concentrações salinas. *Engenharia na Agricultura, Viçosa*, 22(2), 138-149.
- Valladares, F. E., Martinez-Ferri, L., Balaguer, E., Pérez-Corona, E., & Manrique, E. (2000). Low leaf-level response to light and nutrients in mediterranean evergreen oaks: a conservative resource-use strategy? *The New Phytologist*, 148(1), 79-91.
- Viégas, R. A., da Silveira, J. A., Lima-Junior, A. R. D., Queiroz, J. E., & Fausto, M. J. (2001). Effects of NaCl-salinity on growth and inorganic solute accumulation of young cashew plants. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 5, 216-222.
- Voigt, E. L., Almeida, T. D., Chagas, R. M., Ponte, L. F. A., Viégas, R. A., & Silveira, J. A. G. (2009). Source-sink regulation of cotyledonary reserve mobilization during cashew (*Anacardium occidentale*) seedling establishment under NaCl salinity. *Journal of Plant Physiology*, 166(1), 80-89. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2008.02.008>
- Yao, B. Q., Zhao, C. M., Deng, J. M., Zhou, H. K., Zhao, X. Q., & Liu, J. Q. (2013). Phenotypic plasticity of *Thellungiella salsaginea* in response to saline stress. *Evolutionary Ecology Research*, 15(7), 829-846.