





Efecto del déficit hídrico en etapas tempranas de crecimiento de maíces nativos de Tamaulipas

Effect of water deficit on early growth stages of native maize in Tamaulipas

Victor Manuel Toribio-Solis¹, Yolanda del Rocio Moreno-Ramírez¹, Mario Rocandio-Rodríguez^{1*}, Carlos Alexis Urbina-Gaza¹

¹Facultad de Ingeniería y Ciencias-Universidad Autónoma de Tamaulipas. Centro Universitario Adolfo López Mateos, Cd. Victoria, Tamaulipas, México. C.P. 87000. a2153010027@alumnos.uat.edu.mx (V.M.T-S); mrocandio@docentes.uat.edu.mx (M.R-R); yrmoreno@docentes.uat.edu.mx (Y.R.M-R); a2103040265@alumnos.uat.edu.mx (C.A.U-G). *Autor para correspondencia: mrocandio@docentes.uat.edu.mx

RESUMEN: Los maíces nativos presentan capacidad de tolerancia a condiciones adversas de temperatura y escasa precipitación. El objetivo de esta investigación fue identificar poblaciones de maíces nativos tolerantes al déficit hídrico. Se evaluaron seis poblaciones nativas de maíz y dos híbridos como testigos, en condiciones de riego y déficit hídrico, bajo un diseño experimental completamente al azar, se evaluaron las variables; índice relativo de clorofila, contenido de nitratos, contenido relativo de agua y déficit de saturación.

Los genotipos de maíz VPL-compuesto original y Tuxpeño-Palmillas mostraron tolerancia a estrés hídrico, en el contenido de nitratos las poblaciones presentaron mayor acumulación en déficit hídrico excepto el genotipo Tuxpeño-Palmillas. El índice relativo de clorofila los genotipos Nal-Tel × Ratón, Colecta 16, VPL-compuesto original, VPL-derivada

del CO y Tuxpeño-Palmillas acumularon mayor concentración de clorofila en déficit hídrico. Se encontraron diferencias significativas en contenido relativo de agua, déficit hídrico y contenido de nitratos confirmando la capacidad de las poblaciones nativas de maíz para resistir condiciones de déficit hídrico.

PALABRAS CLAVE: clorofila, contenido relativo de agua, nitratos

ABSTRACT: Landraces maize varieties are tolerant to adverse temperature conditions and low rainfall. The objective of this study was to identify populations resistant to water deficit. Six native populations and two hybrids were evaluated as controls under irrigated and water deficit conditions in a completely randomized experimental design. The following variables were evaluated: relative chlorophyll index, nitrate content, relative water

content, and saturation deficit. The VPL-Original Compound and Tuxpeño-Palmillas genotypes showed resistance to water stress. In terms of nitrate content, the populations showed greater accumulation under water deficit conditions, except for the Tuxpeño-Palmillas genotype. The relative chlorophyll index of the Nal-Tel × Ratón, collect 16, VPL-original compound, VPL-derived from CO, and Tuxpeño-Palmillas genotypes accumulated higher chlorophyll concentrations under water deficit. Significant differences were found in relative water content, water deficit, and nitrate content, confirming the ability of native populations to withstand water deficit conditions.

KEYWORDS: chlorophyll, relative water content, nitrates

INTRODUCCIÓN

El cultivo de maíz en México es uno de los granos básicos de la dieta principal de la población, con una producción de 24.3 millones de toneladas anuales distribuidas en una superficie de ocho millones de hectáreas (DGSIAP, 2024). En la actualidad existen problemas severos por los escasos de agua, especialmente para el desarrollo de los cultivos al no poder concretar su desarrollo óptimo (Inzunza-Ibarra *et al.*, 2020), en el cultivo de maíz puede provocar disminuciones en el rendimiento de grano de más del 50 %, dependiendo de la duración, intensidad y la etapa fenológica en la que se presente, sobre todo si el estrés hídrico ocurre durante etapas tempranas de crecimiento, floración y llenado de grano (Sah *et al.*, 2020). En la agricultura de temporal, los maíces nativos presentan variaciones en cantidad y distribución de la precipitación durante sus etapas de crecimiento que generan estrés hídrico provocando la disminución de la acumulación de materia seca en los órganos de la planta, desarrollo del área foliar y la formación de grano, lo que provoca bajos rendimientos (Romero-Contreras *et al.*, 2023). Ante esta problemática los agricultores establecen sus propios métodos de selección basándose principalmente en caracteres cuantitativos y cualitativos como tamaño de mazorca y grano, altura

de la planta, rendimiento, tolerancia a heladas, al viento, al déficit hídrico entre otros (Cruz-González *et al.*, 2024).

Sin embargo, varias condiciones de estrés hídrico afectan la producción de los cultivos, especialmente si el estrés es prolongado, el crecimiento y la producción de las plantas son severamente afectados (Martirena *et al.*, 2019). Al respecto, la escasez de agua constituye una limitación crucial para la producción agrícola. El déficit hídrico y aún más la sequía, se consideran graves al restringir el crecimiento, desarrollo y productividad de las plantas, afectando sus mecanismos fisiológicos y bioquímicos (Cretazzo, 2015). La sequía es uno de los principales factores limitantes de la producción de maíz, ya que la mayor parte de la superficie cultivable depende exclusivamente del agua de lluvia y esta generalmente se presenta en cantidades insuficientes y/o irregularmente distribuidas a lo largo del crecimiento y desarrollo de las plantas (Ortega, 2018).

En este contexto, es necesario considerar alternativas que permitan mitigar los efectos del déficit hídrico. Alguna de ellas, podría ser el aprovechamiento de la variabilidad genética de las poblaciones nativas de maíz, ya que estas pueden tolerar diferentes condiciones de temperaturas, precipitaciones, altitudes y tipos de suelo Martínez-Sánchez *et al.*, 2018). Con ello se podría fortalecer la producción y proporcionar alimentos que requiere la población, así mismo aumentar el rendimiento de grano, conservar el valor nutrimental y sus compuestos bioactivos, cuyo contenido tiene efectos beneficiosos para la salud humana y a su vez integrar los sistemas de producción sostenibles (Pawlak y Kołodziejczak, 2020). Por lo anterior, el objetivo de la presente investigación fue identificar poblaciones sobresalientes de maíz nativo de Tamaulipas, con base en parámetros fisiológicos asociados al déficit hídrico en plántulas, como estrategia de preselección de mejora genética.

METODOLOGÍA

Ubicación del experimento

El experimento se llevó a cabo entre junio y agosto de 2023, en invernadero dentro de las instalaciones de la Facultad de Ingeniería y Ciencias de la Universidad Autónoma de Tamaulipas, en Ciudad Victoria Tamaulipas (23° 42' 54.87" LN, 99° 9' 10.64" LO; a 369 msnm).

Material genético

Se utilizaron seis poblaciones de maíz nativo (Cuadro 1), proporcionadas por el Instituto de Ecología Aplicada de la Universidad Autónoma de Tamaulipas, además de un híbrido y una variedad sintética formados por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) incluidos como testigos, evaluadas en invernadero bajo condiciones de riego y déficit hídrico.

Cuadro 1. Procedencia de poblaciones nativas de maíz cultivadas bajo condiciones controladas.

Número de genotipo	Nombre	Dependencia o Localidad de procedencia
1	H-440	INIFAP
2	VS-409	INIFAP
3	Nal-Tel × Ratón	Ej. El Carrizo, Jaumave
4	Colecta 16	Ej. Francisco Medrano, Jaumave
5	VPL-compuesto original	CB sin selección
6	VPL-derivada del CO	CB con cuatro ciclos de selección
7	Colecta 34	Ej. Magdaleno Cedillo, Tula
8	Tuxpeño de Palmillas	Ej. Llano de Los Azua, Palmillas

H: Híbrido; V: Variedad sintética; VPL: Variedad de polinización libre.

Diseño y unidad experimental

Se utilizó un diseño experimental completamente al azar con tres repeticiones, dando un total de 24 unidades experimentales. La unidad experimental consistió en dos plantas por cada genotipo evaluado.

Conducción del experimento

La siembra se realizó el 5 de junio del 2023, se preparó una mezcla de limo y turba (1:2) donde se llenaron macetas con 1.5 kg del compuesto, posteriormente se colocaron dos semillas por maceta a una profundidad de cuatro centímetros y al mismo tiempo se realizó una aplicación de 100 mL de agua, considerando como riego de germinación. Para seguimiento del cultivo se aplicó otro riego de 100 mL a los tratamientos en condiciones de riego y déficit hídrico. Respectivamente se realizó un ajuste en las aplicaciones de riego, en donde se continuaron aplicando 100 mL de agua al tratamiento de riego, mientras que al tratamiento de déficit hídrico se le proporcionaron solo 40 mL de agua. Se aplicaron 1.5 g de fertilizante triple 16 granulado en la siembra y nuevamente a los cinco 5 días después de la siembra para un buen desarrollo de las plantas. Seguidamente se continuaron aplicando riegos cuando el cultivo lo requería, el resto del mes para los dos tratamientos y en la primera semana del mes de julio llegada la quinta hoja, se extrajeron las plantas para ser analizadas con cada una de las variables.

Variables evaluadas

El índice relativo de clorofila (ICL, unidades SPAD): la cual se consideró a partir de la tercera hoja y cuando esta completó su madurez fisiológica, se utilizó un SPAD (Minolta 502 plus) y se registraron tres mediciones por genotipo para posteriormente considerar el promedio, esto para ambos tratamientos con riego y déficit hídrico. Para el contenido de nitratos (NO_3^-) (CN): se evaluaron cada uno de los tratamientos en el desarrollo vegetativo, donde se consideró la quinta hoja de la planta, para dicho proceso se utilizaron morteros de porcelana, el medidor de nitratos (LAQUAtwin- NO_3) y una micropipeta, dicho proceso dio inicio con la maceración de una porción de la hoja (3 a 4 cm de la parte media) con 1 mL de agua destilada, con la micropipeta se tomaron 300 μL del concentrado obtenido de la maceración de las hojas y agua destilada para después ser colocadas en el medidor de nitratos y tomar las mediciones en ppm.

El contenido relativo de agua (CRA): se determinó y se calculó mediante la fórmula establecida por Barrs y Weatherley (1962).

$$CRA (\%) = \left[\frac{(PF - PS)}{(PT - PS)} \right] * 100$$

Mientras que el déficit de saturación (DS): se obtuvo mediante la siguiente fórmula: 100-Contenido relativo de agua.

Con los promedios de cada unidad experimental se realizó un análisis de varianza de una vía mediante el procedimiento GLM del programa SAS v. 9.0. (SAS Institute, 2002).

Además de una prueba de comparación de medias para identificar las diferencias entre los tratamientos, para identificar genotipos sobresalientes dentro de cada tratamiento, se utilizó el procedimiento PROC GLM de SAS V. 9.0 (SAS Institute, 2002), utilizando la prueba Tukey al 0.05 de probabilidad.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de varianza (Cuadro 2) mostró que tres de las cuatro variables analizadas presentaron diferencias altamente significativas entre los tratamientos; contenido relativo de agua, déficit de saturación y contenido de nitratos, a excepción del índice relativo de clorofila. Entre genotipos se encontraron diferencias significativas solo en las variables contenido de nitratos e índice relativo de clorofila excepto las variables: contenido relativo de agua y déficit de saturación al no presentar ningún cambio.

Cuadro 2. Cuadrados medios del análisis de varianza de cuatro variables evaluadas.

Fuentes de variación	Contenido relativo de agua (CRA)	Déficit de saturación (DS)	Contenido de nitratos (CN)	Índice Relativo de clorofila (IRC)
Tratamiento	817.96**	869.4**	42411.6**	21.33 ns
Genotipo	20.74 ns	20.11 ns	16658.1**	49.34**

** : significancia estadística ($p \leq 0.01$); * : significancia estadística ($p \leq 0.05$); NS: no significativo.

Contenido relativo de agua

Se identificó que el mayor valor entre genotipos (Figura 1), destacaron; VPL - compuesto original con 84.1 % en condición de déficit hídrico y Tuxpeño de Palmillas (83.3 %), similar en condiciones de riego (90.5 y 92.3 %). No obstante, VPL-compuesto original presentó 6.8 % de diferencia entre las condiciones de riego y déficit hídrico. Asimismo, Tuxpeño de Palmillas exhibió una diferencia de aproximadamente 9 % entre el riego y déficit hídrico. El híbrido H-440 presentó la mayor diferencia en porcentaje en condiciones de riego y déficit hídrico, casi 20 %. VPL-derivada del CO presentó 18.8 % de diferencia en ambas condiciones, por lo contrario, el material Colecta 34 mostró el 21.1 % de diferencia en riego y déficit hídrico. La turgencia evaluada por medio del contenido relativo de agua (CRA (%)), ha sido una de las expresiones más utilizada para medir el nivel de agua de un tejido, ya que esta es una medida del contenido de agua respecto al total de agua que este puede almacenar y se expresa como porcentaje debido que permite conocer el estado hídrico en el que se encuentra la planta (Acevedo, 2003). La turgencia es importante ya que se relaciona con el estado de hidratación, debido a que la presión de la turgencia celular y de la hoja se reduce cuando estas se deshidratan por la transpiración y en respuesta a la sequía (Coussement *et al.*, 2020).

En general, el comportamiento que presentaron los genotipos en condiciones de riego fue poco variable, de 90 % a 93.9 %. Contrario a lo observado en déficit hídrico con un intervalo de 70.3 y 84.1 %, es decir cerca de 14 % de variación. Ante lo reportado por Taiz y Zeiger (2007), en donde menciona que la concentración de agua presente en las plantas por encima del 80 % no presentan repercusiones en su crecimiento y desarrollo por lo que las plantas con riego se desarrollaran sin ningún problema. Luna-Flores *et al.* (2023) reportan que porcentajes inferiores al 80 % presentados, pueden ocurrir problemas de disminución sobre la expansión foliar, crecimiento de tallos y raíces. En cuestiones fisiológicas los problemas ocurren en el cierre de estomas, pérdida de turgencia, limitan el intercambio gaseoso y disminuye la fotosíntesis. Además, estos efectos también se ven reflejados directamente en el rendimiento, debido a que disminuye la acumulación

de materia seca en los órganos aéreos de la planta, reduce el desarrollo del área foliar y la formación de grano (Villalobos-González *et al.*, 2016).

hídrico y riego; por lo tanto, los genotipos VPL-compuesto original y Tuxpeño de Palmillas pueden resistir condiciones de déficit hídrico aun con pequeñas cantidades de agua que contenga la planta.

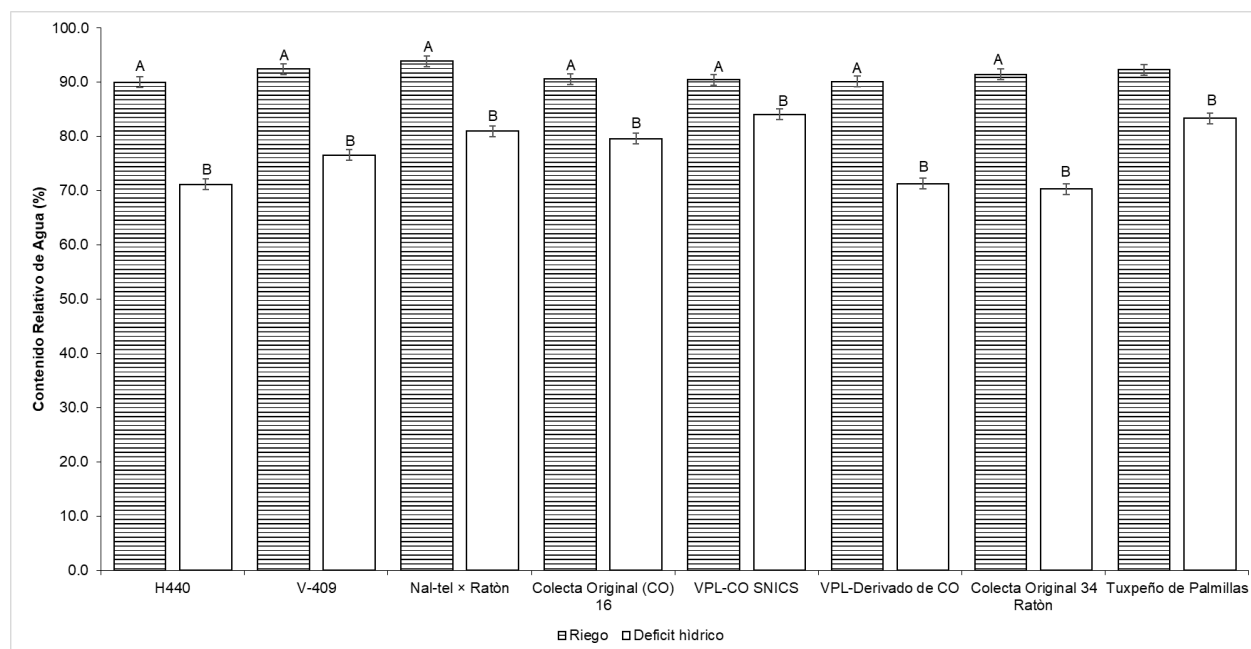


Figura 1. Contenido Relativo de Agua cuantificado en seis poblaciones nativas de maíz y dos genotipos mejorados, establecidos en condiciones de riego y de déficit hídrico. Letras distintas entre columnas de cada genotipo indican disimilitudes entre cada tratamiento evaluados (Tukey; $\alpha=0.05$).

Déficit de saturación

En la figura 2, se identificó que el déficit de saturación (%) para la Colecta 34 obtuvo el mayor valor (29.7 %) bajo condiciones de déficit hídrico, similar al comportamiento presentado por el genotipo VPL - derivada del CO (28.7 %) y el híbrido H-440 con 28.8 %, no obstante, el híbrido presentó el 18.8 % de diferencia en condiciones de déficit hídrico y riego, aproximadamente el 19.0 % de diferencia entre ambas condiciones se comportó la VPL derivada del CO.

Por otra parte, el material Colecta 34 mostró el 21.10 % con relación a su comportamiento en condiciones de déficit hídrico y riego. Asimismo, el genotipo VPL- Compuesto Original presentó el 6.38 % de diferencia en condiciones de déficit hídrico y riego, este valor fue el mínimo observado entre el resto de los materiales evaluados. En cambio, el material Tuxpeño de Palmillas presentó una disimilitud del 8.95 % en condiciones de déficit

De manera contraria, el material H-440, VPL - derivada del CO y Colecta 34 muestran que son los genotipos más susceptibles en condiciones de estrés ya que aun con pequeñas cantidades de agua nos muestran altos niveles de déficit hídrico.

Contenido de nitratos (NO_3^-)

Se observó que a excepción del material Tuxpeño de Palmillas, el resto tiende a presentar mayor acumulación de NO_3^- en déficit hídrico que en riego. El material V-409 y Nal-Tel \times Ratón junto a la Colecta 16 y la VPL compuesto original destacaron en la cantidad de NO_3^- registrados, presentando en promedio 438.7 ppm de NO_3^- por lo que tendieron a ser más eficientes para acumular nitratos en condiciones de déficit hídrico. En contraste, en condiciones de riego los materiales H-440 y V-409 fueron los que tendieron a presentar menor contenido de NO_3^- en riego mostrando un promedio de 234.7 ppm en contenido de nitratos, por otro lado, el resto de los genotipos mostraron una mayor acumulación

de nitratos presentando en promedio un valor de 331.5 ppm de contenido de NO_3^- (Figura 3).

favorecería en el número total de granos y por lo tanto al potencial productivo del cultivo (Sánchez, 2015).

Índice de clorofila

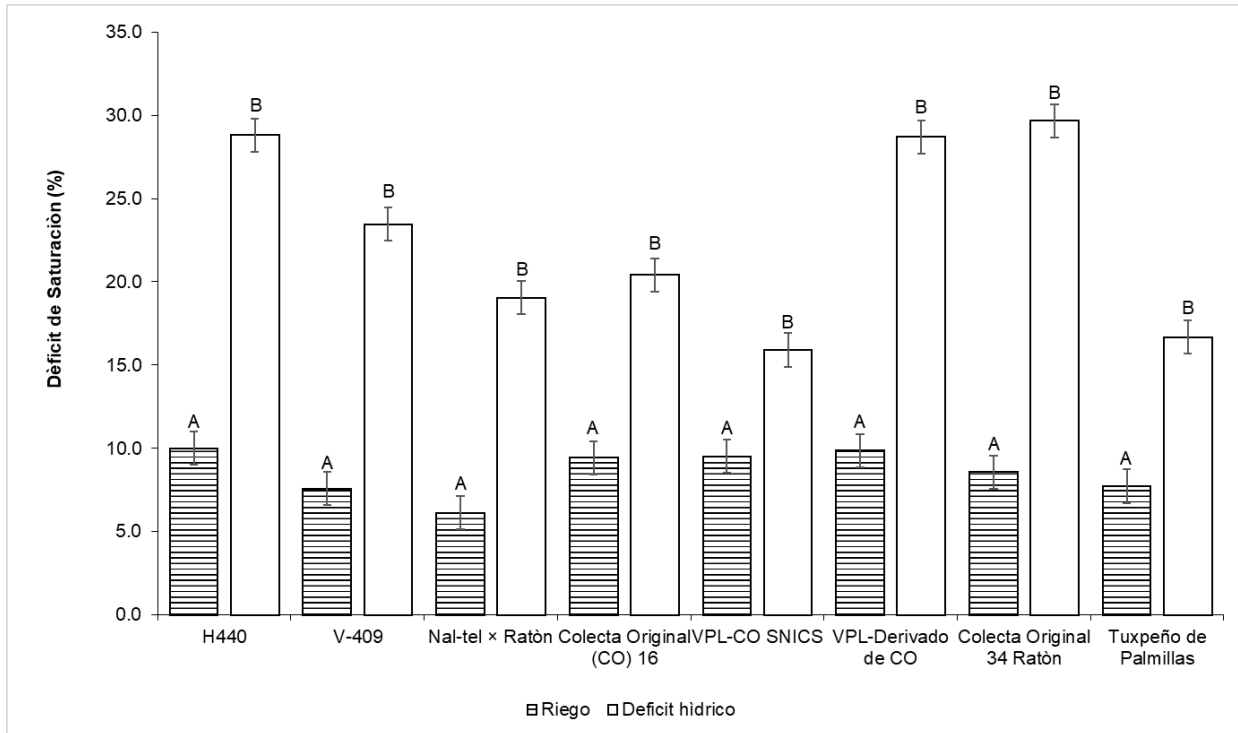


Figura 2. Gráfico de comparación de medias de la variable Déficit de saturación obtenido en seis poblaciones nativas de maíz y dos genotipos mejorados establecidos en condiciones de riego y de déficit hídrico. Letras distintas entre columnas de cada genotipo indican disimilitudes entre cada tratamiento evaluados (Tukey; $\alpha = 0.05$).

El contenido de nitratos indica que la concentración en el tejido de las plantas es una manera de mostrar el nivel de suficiencia de nitrógeno en la planta (Geraldson y Tyler, 1990). La concentración de nitratos favorece al desarrollo de las etapas vegetativas (v y vi) previas a las etapas reproductivas, que en conjunto favorecerían el rendimiento al presentar concentraciones óptimas, dando como resultado: plantas “cuateras”, con mayor número de hileras y granos en la mazorca y por lo tanto mayor peso de la mazorca (Zamudio- González *et al.*, 2015). De lo contrario bajas concentraciones inhiben el crecimiento y por lo tanto su desarrollo (Rocha *et al.*, 2016). Las poblaciones evaluadas que presentaron un buen estado nutricional nitrogenado en la etapa vegetativa V5 que es cuando se realizaron las extracciones, si se conservan dichas concentraciones beneficiarían en su desarrollo lo que a futuro

SPAD, mientras que nueve días posteriores, el valor de ICL disminuyó a 7.09 unidades SPAD, así hasta el final de la evaluación donde este valor decreció a 9.11 unidades SPAD (Figura 4). Igualmente, se observó que el híbrido H-440 inició con 35.83 unidades SPAD a ocho DDS, posteriormente la acumulación de clorofila incremento a 44.47, es decir aproximadamente 8.53 de ICL.

El genotipo V-409 empezó estable presentando valores de 34.39 en su registro de ICL los primeros días después de la siembra, no obstante, se observaron importantes variaciones a partir de los 15 DDS mostrando distintos valores de ICL, si bien el genotipo Nal-Tel x Ratón empezó con 30 unidades de índice de clorofila se pudo observar que se comportó de forma estable hasta los 23 DDS, después de este periodo decae el índice de clorofila. Por otra parte, el

genotipo VPL - derivada de CO mostró de manera estable los primeros 15 días después de la siembra en un rango de 34 unidades SPAD, no obstante, decayó ligeramente los siguientes dos días después de la siembra, aunque después aumentó su valor a 37

SPAD. Finalmente, la población Colecta 16 fue más invariable los primeros 21 DDS presentando un valor de 30.70 unidades SPAD, posteriormente a los 26 DDS disminuyó 1.1 unidades SPAD.

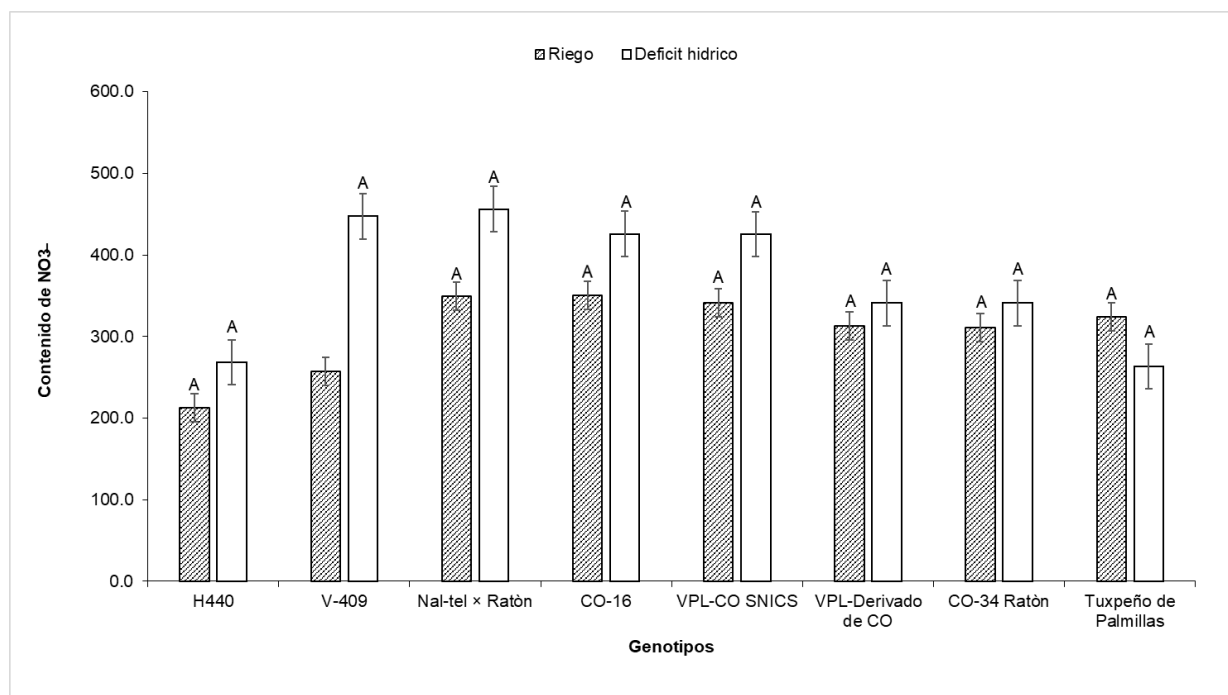


Figura 3. Gráfico de comparación de medias de la variable valor promedio de NO_3^- analizados en poblaciones nativas de maíz un híbrido y una variedad sintética establecidos en condiciones de riego y déficit hídrico. Letras distintas entre columnas de cada genotipo indican disimilitudes entre cada tratamiento evaluados (Tukey; $\alpha = 0.05$).

Transcurrido cierto periodo alcanzó un valor de 51.3 unidades SPAD lo que en la figura 5 fue indicado como un pico máximo, continuó así hasta volver a un punto estable.

Por otro lado, el material VPL - derivada del CO presentó 34.77 unidades SPAD, cabe señalar que al comienzo se comportó de manera estable hasta llegar a los 24 DDS donde disminuyó sus cantidades de clorofila. De igual forma el genotipo Colecta 34 inicialmente se comportó de manera estable con un promedio de 33.61 unidades SPAD de tal manera que fue decreciendo el valor en los últimos ocho días presentando un valor de 4.6 unidad SPAD. Asimismo, el material Tuxpeño de Palmillas mostró un comportamiento constante hasta los 17 DDS con un valor promedio de 33.60 unidades SPAD, mientras que nueve días posteriores restó a 2.5 unidades

Durante el desarrollo de los genotipos estos mostraron variaciones importantes en la acumulación de clorofila estimada a través de unidades SPAD, aunque hubo variaciones durante el desarrollo de la tercera hoja en el promedio poblacional, seis de las ocho poblaciones evaluadas obtuvieron menor contenido de clorofila en unidades SPAD y este promedio fue de 30.91. Los genotipos VPL - compuesto original y VPL - derivado del CO destacaron con tres unidades más de clorofila sobre el resto del promedio de la población, se consideró que tuvieron más habilidad para fotosintetizar. Los valores de índices de clorofila reportados se mantuvieron por debajo ante los reportados por Rocha (2016), donde menciona que valores inferiores de 36 a 40 unidades SPAD en la etapa V3, las hojas presentan dificultad para expandirse y por lo tanto no

fotosintetizan con intensidad y no logran procesar completamente sus asimilados.

otra parte, el híbrido V-409 presentó un comportamiento similar en ambas condiciones, bajo condiciones de riego obtuvo 29.50 de ICL y en déficit hídrico 29.62 de ICL. Mientras que los genotipos Nal-Tel × Ratón, colecta 16, VPL - compuesto original y VPL - derivada del CO resultaron favorecidos en condiciones de déficit hídrico, incluso el genotipo

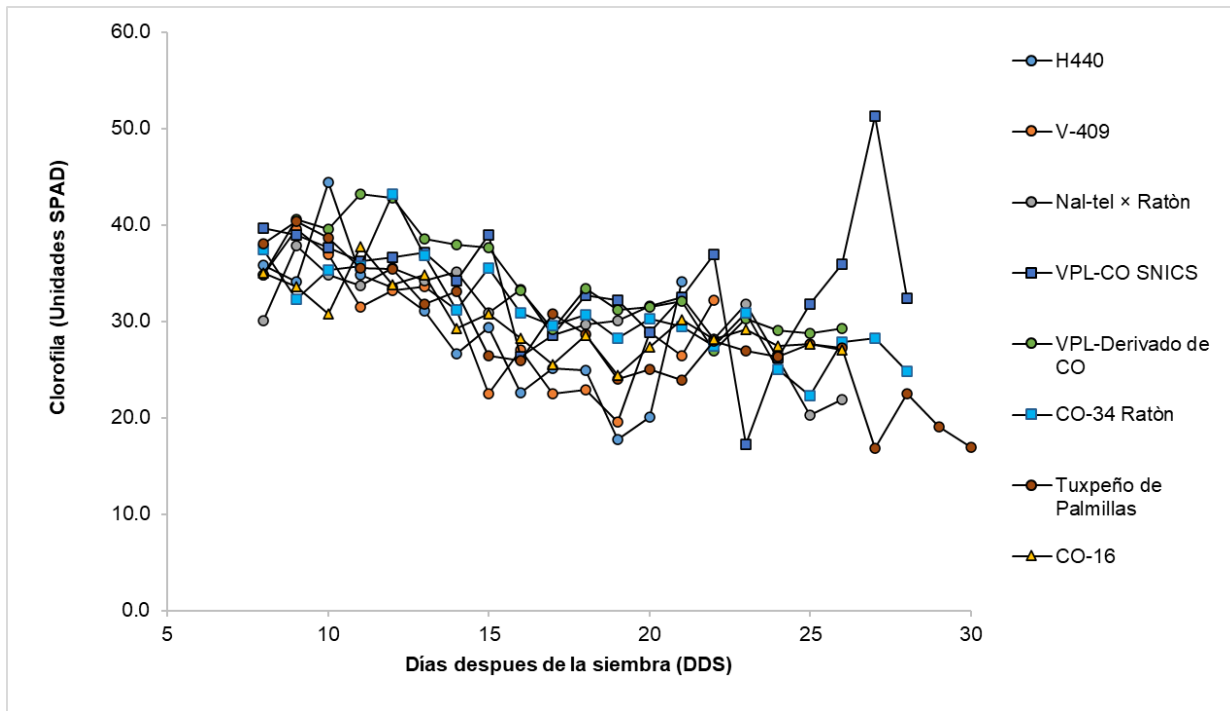


Figura 4. Comportamiento del contenido de Clorofila en los genotipos maíz evaluados hasta 30 dds, en condiciones de riego.

El resultado de estos valores altos en el índice de clorofila con déficit hídrico se relaciona con lo descrito por Núñez-Cano *et al.* (2018) donde menciona que existe una relación negativa en concentraciones hídricas bajas será mayor el índice de clorofila relacionado con el mecanismo de cierre de estomas acompañado de temperaturas altas las estomas se cierran en horas centrales del día para evitar disminuciones hídricas excesivas. Añadiendo que si el estrés hídrico es aún más intenso solo se habrían a las primeras horas del día lo que provocaría el aumento de la transpiración (Ochoa-Medina, 2014).

Para la clorofila, el contenido promedio poblacional en unidades SPAD para el genotipo bajo las condiciones de riego y déficit hídrico (Figura 6) fue de 31.56. El híbrido H-440 en condiciones de riego se mantuvo tres unidades más que el déficit hídrico, por

Tuxpeño de Palmillas alcanzo valores de ICL cercanos al promedio poblacional.

Por último, se obtuvo el promedio poblacional de clorofila en unidades SPAD para el genotipo en las dos condiciones: riego y déficit hídrico (Figura 6) fue de 31.56. El híbrido H-440 en condiciones de riego se mantiene tres unidades más que en déficit hídrico, por otro lado, el híbrido V-409 se comportó de manera similar en ambas condiciones en riego presentó un valor de 29.50 de ICL y en déficit hídrico mostró un valor de 29.62 de ICL. Mientras que, los genotipos Nal-Tel × Ratón, Colecta 16, VPL - compuesto original y VPL - derivada del CO se ven beneficiados en condiciones de déficit hídrico, incluso el genotipo Tuxpeño de Palmillas alcanzó valores de ICL cercanos al promedio poblacional. Estos resultados permiten inferir que dichos materiales lograron acumular clorofila en condiciones de déficit hídrico

de manera que su habilidad fotosintética está funcionando bien, por lo que estos genotipos podrían estar haciendo un buen ajuste osmótico para seguir utilizando su fotosíntesis y en consecuencia crecer.

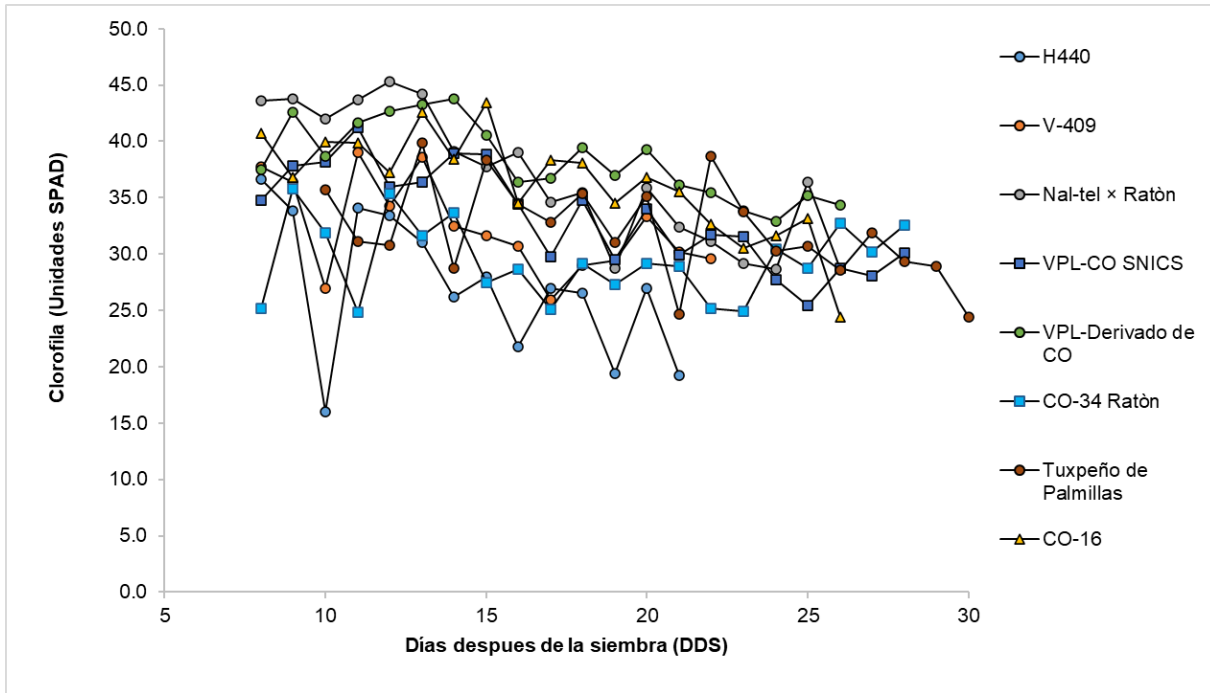


Figura 5. Comportamiento del contenido de Clorofila en los genotipos maíz evaluados hasta 30 DDS, en condiciones de déficit hídrico.

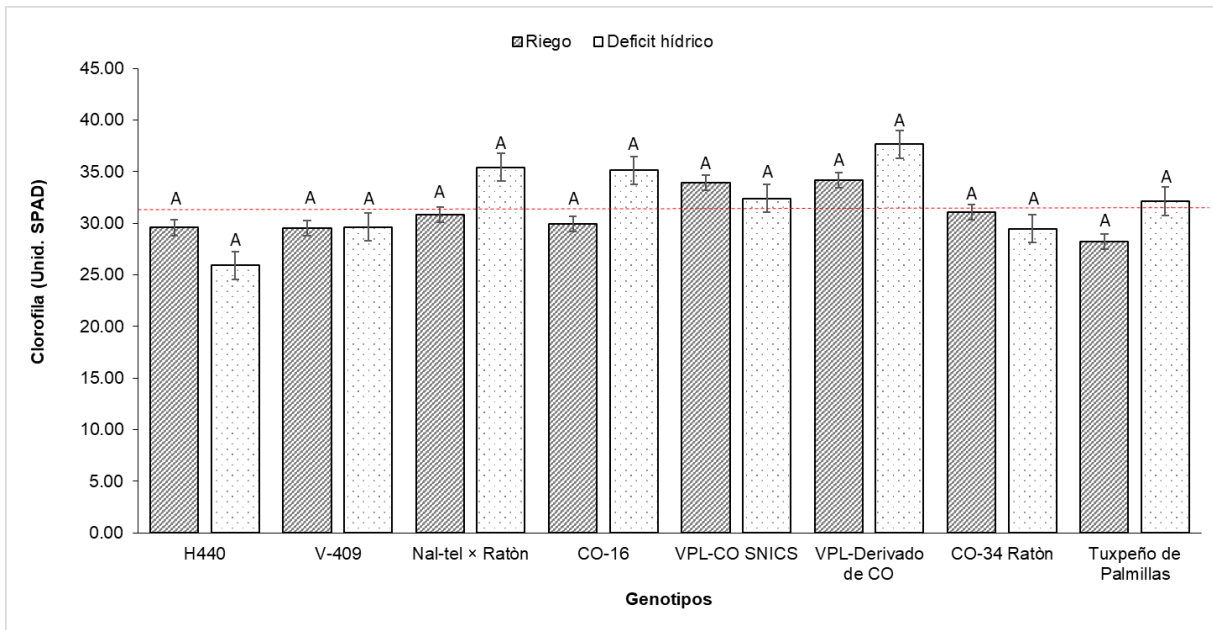


Figura 6. Contenido de Clorofila (Unidades SPAD) en condiciones hídricas opuestas. Letras distintas entre columnas de cada genotipo indican disimilitudes entre cada tratamiento evaluado (Tukey; $\alpha = 0.05$).

CONCLUSIONES

El ANOVA mostró diferencias estadísticas entre los tratamientos para Contenido Relativo de agua, Déficit de saturación y Contenido de nitratos. El genotipo VPL - compuesto original y el Tuxpeño de Palmillas presentan valores similares de CRA tanto en riego como en déficit hídrico, lo cual sugiere que tienen el potencial de tolerancia a niveles de estrés hídrico. Los genotipos de maíz VPL - compuesto original y Tuxpeño de Palmillas pueden resistir condiciones de déficit hídrico aun con pequeñas cantidades de agua que contenga la planta. Estos genotipos resultaron mantener buen desempeño en concentraciones reducidas de agua disponible en la planta, constituyendo poblaciones sobresalientes de maíz nativo en Tamaulipas, el híbrido H-440 mostró la mayor diferencia porcentual entre condiciones de riego y déficit hídrico, evidenciando una menor estabilidad fisiológica frente al estrés.

DECLARAR SIN CONFLICTOS DE INTERES

Sin conflicto de interés.

ORCID DE LOS AUTORES

<https://orcid.org/0009-0001-2468-2363>

<https://orcid.org/0000-0002-1580-1471>

<https://orcid.org/0000-0002-8296-0843>

<https://orcid.org/0009-0007-3329-7460>

REFERENCIAS

- Acevedo, E. Resistance to abiotic stresses. En: *Plant Breeding: Principles and Prospect*. London:Chapman & Hall, 2003, p. 406-418
- Barrs, H.D., & Weatherley, P. E. (1962). A Re-Examination of the Relative Turgidity Techniques for Estimating Water Deficits in Leaves. *Australian Journal of Biological Sciences*, 15: 413-428. doi: <http://dx.doi.org/10.1071/BI9620413>
- Bennetzen, J. and S. Hake. (2009). *Handbook of maize: its biology*, Nueva York, Springer.
- Coussement, J. R., De Swaef, T., Lootens, P., & Steppe, K. (2020). Turgor-driven plant growth applied in a soybean functional–structural plant model. *Annals of Botany*, 126: 729-744. doi: 10.1093/aob/mcaa076
- Cretazzo, E. (2015). Respuesta al déficit hídrico de la vid: Maneras de adaptarse a la sequía al incrementar la eficiencia en el uso del agua. *Encuentros en la Biología*, 9: 38-43. <https://revistas.uma.es/index.php/enbio/article/view/17987>
- Geraldson, C. M. and K. B. Tyler. (1990). Plant analysis as an aid in fertilizing vegetable crops. In: *Soil Testing and Plant Analysis*. Soil Science Society of America Inc. Madison, Wisconsin.
- Luna-Flores, W., Estrada-Medina, H., Morales-Maldonado, E., & Álvarez Rivera, O. (2023). Estrés por déficit hídrico en plantas: una revisión. *Chilean Journal of Agricultural & Animal Sciences*, 31: 61-69. <https://revistas.udec.cl/index.php/chjaas/article/view/10498>
- Martirena-Ramírez, A., Veitía, N., Torres, D., Rivero, L., García, L. R., Collado, R., & Ramírez-López, M. (2019). Longitud de la raíz: indicador morfológico de la respuesta al estrés hídrico en L. en casa de cultivo. *Biotecnología Vegetal*, 19: 225-233. <http://scielo.sld.cu/pdf/bvg/v19n3/2074-8647-bvg-19-03-225.pdf>
- Inzunza-Ibarra, M. A., Villa-Castorena, M. M., Catalán-Valencia E. A., López-López R., & Sifuentes-Ibarra, E. (2018). Rendimiento de grano de maíz en déficit hídrico en el suelo en dos etapas de crecimiento. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 41 (3): 283 – 290. <https://doi.org/10.35196/rfm.2018.3.283-290>
- Cruz-González, Alejandro, Arteaga-Ramírez, Ramón, Sánchez-Cohen, Ignacio, Soria-Ruiz, Jesús, & Monterroso-Rivas, Alejandro Ismael. (2024). Impactos del cambio climático en la producción de maíz en México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 15(1), e3327. <https://doi.org/10.29312/remexca.v15i1.3327>
- Martínez-Sánchez, J., Espinosa-Paz, N., Ramírez-Cordoba, A. L., Camas-Gómez, R., & Villegas Aparicio, Y. (2018). Expresión fenotípica y estabilidad en poblaciones de maíz nativo de Chiapas. *Revista Mexicana de Agroecosistemas*. (1): 1-11, 2
- Núñez-Cano, J., Gordón-Mendoza, R., Franco-Barrera, J., Jaén-Villarreal, J., Sáez-Cigarruista, A., Ramos-Manzané, F., & Ávila-Guevara, A. (2018). Índice hídrico de dos cultivares de maíz bajo dos sistemas de siembra. *Ciencia Agropecuaria*, 29: 99-111.
- Ochoa-Medina, W. A. (2014). Uso de medidores de clorofila como herramienta para optimizar el uso de fertilizantes nitrogenados en el cultivo de maíz (*Zea mays* L.): Reporte de caso. *Revista Agropecuaria Y Agroindustrial La Angostura*, 1: 41-48. <https://doi.org/10.23850/raaa.v1i1.14>

- Ortega-Gaucín, D. (2018). Medidas para afrontar la sequía en México: una visión retrospectiva. *Revista de El Colegio de San Luis*, 8: 77-105. doi: <https://doi.org/10.21696/rcsl8152018743>
- Pawlak, K., & Kołodziejczak, M. (2020). The role of agriculture in ensuring food security in developing countries: Considerations in the context of the problem of sustainable food production. *Sustainability*, 12: 5488. doi: <https://doi.org/10.3390/su12135488>
- Rocha, D. M., Souza, E. G., Nobrega, L. H. P., Bazzi, C. L., & Gasparin, E. (2016). Correlación y Dependencia Espacial de Atributos de Suelo, Índice de Clorofila e Productividad del Maíz. *Revista de Ciencia y Tecnología*, 25: 62-69. <https://www.fceqyn.unam.edu.ar/recyt/index.php/recyt/article/view/352>
- Romero-Contreras, A. T., Becerril-Piña, R., Díaz-Delgado, C., Mastachi-Loza, C. A., Vilchis-Francés, A., & Arévalo-Mejía, R. (2023). Maíz de temporal: ¿es suficiente el conocimiento etnoecológico para afrontar la variabilidad climática? *Economía, sociedad y territorio*, 23: 185-215. doi: <https://doi.org/10.22136/est20231892>
- Sah, R. P., Chakraborty, M., Prasad, K., Pandit, M., Tudu, V. K., Chakravarty, M. K., Narayan S.C., Rana M., & Moharana, D. (2020). Impact of water deficit stress in maize: Phenology and yield components. *Scientific reports*, 10: 2944. doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59689-7>
- Sánchez, A., Delgado, R., Lorbes, J., Rodríguez, V., Figueredo, L., & Gómez, C. (2015). Diagnóstico e índice para fertilización nitrogenada en etapa vegetativa del cultivo maíz (*Zea mays* L.). *Revista Unellez de Ciencia y Tecnología*, 33: 75-82. <http://revistas.unellez.edu.ve/index.php/ruct/article/view/248/236>
- SAS Institute. (2002). *Sas/stat User's Guide, Software version 9.0*. Cary, N.C., USA.
- DGSIAP. (2024). Dirección General del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/
- Taiz, L., and E. Zeiger. (2007). *Plant physiology das Original mit Übersetzungshilfen*. Heidelberg, Germany. Spektrum Akademischer Verlag.
- Villalobos-González, A., López-Castañeda, C., Miranda-Colín, S., Aguilar-Rincón, V. H., & López-Hernández, M. B. (2016). Relaciones hídricas en maíces de Valles Altos de la Mesa Central de México en condiciones de sequía y fertilización nitrogenada. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 7: 1651-1665. doi: <https://doi.org/10.29312/remexca.v7i7.157>
- Zamudio-González, B., Tadeo-Robledo, M., Espinosa-Calderón, A., Martínez Rodríguez, J. N., Celis-Euan, D. I., Valdivia-Bernal, R., & Zaragoza-Esparza, J. (2015). Eficiencia agronómica de fertilización al suelo de macro nutrientes en híbridos de maíz. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 6: 1557-1569. doi: <https://doi.org/10.29312/remexca.v6i7.549>