



IPICTY

**INSTITUTO POTOSINO DE
INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA
Y TECNOLÓGICA, A.C.**

POSGRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

**TOLERANCIA DE UNA RAZA DE MAÍZ ORIGINARIA DE MÉXICO, EL
CÓNICO NORTEÑO, AL CAMBIO CLIMÁTICO**

Tesis que presenta

Miguel Ángel Esparza Esparza

Para obtener el grado de

Maestro en Ciencias Ambientales

Director de la Tesis

Dr. Ernesto Iván Badano

San Luis Potosí, México, noviembre de 2023



Constancia de aprobación de la tesis

La tesis “Tolerancia de una raza de maíz originaria de México, el cónico norteño, al cambio climático”, presentada para obtener el Grado de Maestro en Ciencias Ambientales, fue elaborada por Miguel Ángel Esparza Esparza y aprobada el 08 de diciembre de 2023 por los suscritos, designados como Jurado de Tesis por el Colegio de Profesores de la División de Ciencias Ambientales del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

Dr. Ernesto Iván Badano
Director de tesis

Dr. Joel David Flores Rivas
Sinodal

Dr. Felipe Barragán Torres
Sinodal

Dr. Fredy Alexander Alvarado Roberto
Sinodal



Créditos Institucionales

Esta tesis fue elaborada en la División de Ciencias Ambientales del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., bajo la dirección del Dr. Ernesto Iván Badano.

Durante la realización del trabajo, el autor recibió una beca académica del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Número de Registro 1151118) y del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C.

Esta investigación de tesis fue financiada por el Fondo Institucional de Fomento Regional para el Desarrollo Científico, Tecnológico y de Innovación mediante el proyecto “Evaluación y optimización de los recursos hídricos en el nexa agricultura-sociedad-industria en tres zonas del país: árida, bajío y tropical, hacia un modelo de transferencia y política pública”, con clave FORDECYT clave 297525, del cual forma parte el Dr. Ernesto I. Badano.

Acta de Examen

Dedicatoria

¡A mi familia! A ustedes les debo cada logro de mi vida. Siempre han creído en mí y me han motivado a seguir. Gracias a ustedes he llegado aquí.

A ti, Yuritzzy, por tu amor, tu confianza, por creer en mí, por tus ánimos y por todo tu apoyo en esta etapa tan importante de mi vida.

Agradecimientos

A la División de Ciencias Ambientales del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, por permitirme realizar mi proyecto de maestría en sus instalaciones, además de las facilidades otorgadas para el desarrollo del mismo.

Agradezco la formación científica y académica brindada por los asesores de la tesis, así como las experiencias y conocimientos compartidos. En especial agradezco el conocimiento, dirección y el compromiso del Dr. Ernesto Iván Badano, quien además de orientarme durante esta investigación, me enseñó nuevas habilidades y herramientas que, sin duda, me servirán en el futuro.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por la beca otorgada para llevar a cabo mis estudios de posgrado.

Agradezco también al grupo de trabajo del Dr. Badano por los consejos y charlas que mantuvimos durante el trabajo. Esto hizo mucho más ameno el trabajo, forjando una estrecha camaradería en su el transcurso.

Agradezco al M.C. Juan Pablo Rodas Ortiz por el apoyo y asesoría brindados en el uso de instrumental de campo y laboratorio, como también su colaboración en el montado del experimento.

Se agradece el apoyo financiero para la investigación aportado por el Fondo Institucional de Fomento Regional para el Desarrollo Científico, Tecnológico y de Innovación mediante el proyecto “Evaluación y optimización de los recursos hídricos en el nexo agricultura-sociedad-industria en tres zonas del país: árida, bajío y tropical, hacia un modelo de transferencia y política pública”, con clave FORDECYT clave 297525, del cual forma parte el Dr. Ernesto I. Badano.

CONTENIDOS

Constancia de aprobación de tesis	II
Créditos institucionales	III
Acta de examen	IV
Dedicatoria	V
Agradecimientos	VI
Resumen	VIII
Palabras clave	IX
Abstract	X
Keywords	XI
Introducción	1
Materiales y métodos	4
Resultados	15
Discusión	22
Conclusiones	30
Bibliografía	31

RESUMEN

El maíz es el cereal más importante de México, pero este cultivo puede ser afectado negativamente por los incrementos de aridez (mayor temperatura y menor precipitación) que está induciendo el cambio climático. Aunque muchos cultivos de maíz se desarrollan bajo riego (no dependen de la precipitación), la mayor parte del maíz mexicano corresponde a cultivos de temporal, o secano, sembrándose principalmente razas nativas que están adaptadas a los diferentes tipos de climas que se presentan en el país. Entre estas razas se diferencian los maíces de ciclo largo (200 días entre siembra y cosecha), los de ciclo intermedio (120-130 días entre siembra y cosecha) y los de ciclo corto (menos de 90 días entre siembra y cosecha). Debido a que las razas de ciclo corto se desarrollan bajo regímenes de precipitación restringidos, puede proponerse que algunas de ellas pudieran tolerar las condiciones de aridez intensificada que se esperan en el futuro próximo. Esta hipótesis se puso a prueba con la raza nativa de maíz Cónico Norteño, el cual se cultiva en regiones áridas y semiáridas del centro de México. Para esto, se desarrolló un experimento en un ecosistema árido, donde se sembró el maíz bajo condiciones las condiciones de cambio climático predichas para mediados de siglo (periodo 2041-2060) y bajo el clima actual. Tras la siembra, se monitoreó regularmente la emergencia y supervivencia de plantas por 60 días y, al final del experimento, sobre las plantas sobrevivientes se midieron variables indicadoras de su desempeño relacionadas a la fluorescencia de la clorofila y el crecimiento vegetativo. Los resultados indicaron que las plantas de maíz expuestas a condiciones de cambio climático tuvieron mayores tasas de emergencia, supervivencia y crecimiento, a la vez que tendrían un mejor desempeño fotosintético, que las desarrolladas bajo el clima actual. Esto sugiere que el maíz Cónico Norteño tiene una alta capacidad para tolerar las condiciones de aridez intensificada esperadas al corto plazo.

Palabras Clave: Cambio climático, Crecimiento vegetal, Cultivos de maíz, Fluorescencia de la clorofila, Maíz nativo mexicano, Supervivencia de plantas

ABSTRACT

Corn is the most important cereal in Mexico, but this crop can be negatively affected by the increases in aridity (higher temperature and lower precipitation) that are expected with the advance of climate change. Although many corn crops are grown under irrigation (they do not depend on precipitation), most Mexican corn crops are rainfed and are developed from native races that are adapted to the different climate types of this country. Among these races, there are long cycle corn crops (200 days between sowing and harvesting), intermediate cycle corn crops (120-130 days between sowing and harvesting) and short cycle corn crops (less than 90 days between sowing and harvesting). Because short-cycle races develop under restricted precipitation regimes, it can be proposed that some of them could tolerate the intensified aridity expected in the near future. This hypothesis was tested with the native corn race Conico Norteño, which is grown in arid and semi-arid regions of central Mexico. For this, an experiment was developed in an arid ecosystem, where corn seeds were sowed under the climate change conditions predicted by the middle of this century (period 2041-2060) and under the current climate. After the sowing of seeds, the emergence and survival of plants were regularly monitored during 60 days and, at the end of the experiment, variables indicative of the performance of surviving plants, related to chlorophyll fluorescence and vegetative growth, were measured. The results indicated that corn plants exposed to climate change conditions had higher emergence, survival and growth rates, while they also had better photosynthetic performance, than those developed under the current climate. This suggests that the corn race Conico Norteño has an elevated capability to tolerate the intensified aridity conditions expected in the short term.

Keywords: climate change, chlorophyll fluorescence, corn crops, Mexican native maize, plant survival, plant growth

INTRODUCCIÓN

El maíz (*Zea mays* L., Poaceae) fue domesticado en México (Matsuoka et al., 2002), donde constituye un pilar de la alimentación de su población desde épocas precolombinas (Callen, 1965; Tracy, 1999). Es el cereal más importante de este país, sembrándose anualmente entre seis y ocho millones de hectáreas, de las cuales más de 80% corresponde a cultivos de temporal, o secano, mientras que el resto constituyen cultivos bajo riego (Reyes-Santiago et al., 2022). El maíz de temporal es fundamental para más de 2.6 millones de pequeños productores mexicanos que trabajan superficies inferiores a 5 ha, quienes lo utilizan para autoconsumo y la producción de forraje (Damián-Huato et al., 2014). Los principales factores que reducen el rendimiento del maíz de temporal son las malezas (plantas silvestres que invaden los cultivos), las plagas y las enfermedades (virus, bacterias, hongos e insectos) y la pobreza nutricional de los suelos (Bennett et al., 2012), pero el cambio climático constituye un riesgo cada vez más evidente para este cultivo (Murray-Tortarolo et al., 2018).

El cambio climático se atribuye a la creciente emisión de gases de efecto invernadero atribuible a las actividades humanas (Arora, 2019). Los modelos de circulación general predicen que la temperatura media anual del planeta puede aumentar más de 5 °C hacia finales de este siglo si no se reducen prontamente estas emisiones, lo que a su vez alterará los regímenes de lluvia e intensificará las condiciones de aridez en varias regiones del planeta (Cook et al., 2020; Murray-Tortarolo, 2021). En general, se espera que estas condiciones climáticas afecten negativamente a los cultivos de temporal porque mayor temperatura y sequía aumentarían la mortalidad de plantas y reducirían su crecimiento (DaMatta et al., 2010;

Mendelsohn, 2008; Olesen et al., 2011; Wang et al., 2018). Sin embargo, la mayoría de estos efectos se han reportado para variedades comerciales mejoradas de maíz, las que tienen menos variabilidad genética las variedades silvestres y, consecuentemente, poseen una menor tolerancia ante los cambios climático (Jarvis et al., 2008).

Aunque en México se cultivan variedades comerciales mejoradas de maíz, la mayor parte de la producción corresponde a alguna de las 59 razas nativas del país (Sanchez et al., 2000). En este contexto, el término “raza” se emplea para agrupar variedades de maíz que comparten características morfológicas y genéticas por tener una historia de cultivo común, ya que los productores reservan parte de las semillas cosechadas en cada ciclo productivo para sembrarlas en el siguiente, generándose procesos de selección artificial que adapta a cada raza a climas específicos (Kato-Yamakake et al., 2009). Las razas mexicanas de maíz de temporal pueden tener ciclos productivos largos (más de 200 días entre la siembra y la cosecha), intermedios (120 a 130 días entre la siembra y la cosecha) y cortos (menos de 90 días entre la siembra y la cosecha), lo que está directamente relacionado con la duración de la temporada de lluvias (Castillo-Nonato, 2016; Ramírez, 2013). En general, los pequeños productores de zonas áridas y semiáridas siembran razas de ciclo corto porque se desarrollan con temporadas de lluvias duran menos de cuatro meses (Eagles & Lothrop, 1994; Kato-Yamakake et al., 2009), lo que permite hipotetizar que algunas de ellas pudieran tolerar las condiciones de aridez intensificada que se esperan en el futuro próximo.

La hipótesis anterior se puso a prueba con la raza nativa de maíz Cónico Norteño, que es de ciclo corto y se cultiva en regiones áridas y semiáridas del centro de México. Este genotipo de maíz se originó a partir de una raza más antigua que tiene requerimientos hídricos ligeramente superiores, el Cónico de la Mesa Central, pero la

constante selección artificial desde épocas precolombinas ha llevado a que el Cónico Norteño sea una raza adaptada a climas cálidos y secos (Sanchez et al., 2000; Wellhausen et al., 1951). Dadas estas características, evaluamos experimentalmente las respuestas de las plantas de maíz Cónico Norteño ante las condiciones de aridez intensificada que se esperan en México en el corto plazo (período 2041-2060). Sobre este punto, debido a que estudios previos indican que los estados tempranos del maíz son más afectados por cambios de temperatura y precipitación que las plantas adultas (Diédhiou et al., 2022; Li et al., 2014; Min et al., 2021), nuestro estudio se enfocó en el desarrollo de plantas jóvenes de maíz bajo condiciones de aridez intensificada en un agroecosistema árido.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio de estudio y origen de las semillas de maíz

El experimento destinado a evaluar los efectos del cambio climático sobre el maíz Cónico Norteño se realizó en el año 2022 en un campo de cultivo abandonado localizado en las inmediaciones de la ciudad de San Luis Potosí, México central (22°8'57'' N, 101°2'44'' O, 1904 m). El clima en el sitio de estudio es árido-semicálido, con una temperatura media anual de 19 °C y precipitaciones en verano de 220 a 300 mm (García, 2004). Su vegetación está compuesta por hierbas anuales (*Bidens pilosa*, *Bouteloua curtipendula*, *Sphaeralcea angustifolia*, *Xanthisma gracile*, entre otras) y arbustos dispersos (*Dalea bicolor*, *Haplopappus venetus*, *Condalia mexicana*, entre otros). Se escogió este sitio porque, además de corresponder con el tipo de clima donde se cultiva el maíz Cónico Norteño, es un área protegida por el gobierno municipal de la Ciudad de San Luis Potosí, cuyo personal garantizó la seguridad de los investigadores y las unidades experimentales.

Las semillas de maíz Cónico Norteño requeridas para el experimento (Figura 1) fueron provistas por pequeños productores del municipio de Mexquitic de Carmona, localizado 15 km al noroeste del sitio experimental (22°15'57'' N, 101°6'47'' O), las que correspondían a la cosecha del año 2021. Estas semillas fueron almacenadas en bolsas de papel a temperatura ambiente hasta que fueron usadas en el experimento descrito más abajo. En los agroecosistemas de esta región, los maíces con ciclos de cultivo corto se siembran entre junio y agosto para cosecharse entre septiembre y noviembre, lo que usualmente corresponde al trimestre más lluvioso del año (Ruiz-Corral et al., 2013).



Figura 1. Semillas de maíz de la raza Cónico Norteño empleadas en el experimento, las que fueron provistas por los pequeños productores del municipio de Mezquitic de Carmona, estado de San Luis Potosí, Mexico. Créditos de la fotografía: Miguel Ángel Esparza-Esparza.

Simulación de cambio climático

Para realizar experimentos de campo donde se simulan las condiciones de aridez esperadas en escenarios de cambio climático, en una primera instancia se requiere establecer cuánto aumentará la temperatura y cuánto se reducirá la precipitación en el sitio de estudio en un período de tiempo futuro (Badano et al., 2019; Guerra-Coss et al., 2021). En este estudio, nos enfocamos en simular las condiciones de aridez esperadas a mediados de este siglo (período 2041-2060) durante el trimestre más lluvioso del año, que son los meses en que se cultiva el maíz de temporal. Para esto, calculamos la diferencia local entre valores futuros y actuales de temperatura media del aire y de precipitación acumulada. Debido a que no hay registros de estas variables en el sitio de estudio, sus valores actuales se estimaron promediando las normales climatológicas (valores medios de los últimos 30 años) registradas por las tres estaciones climáticas del Servicio Meteorológico Nacional de México más cercanas al mismo, que se localizan en un radio de 7 km a su alrededor (consultado el 12 de mayo de 2022 en <https://smn.conagua.gob.mx>). Este procedimiento estimó que, actualmente, la temperatura del aire en el trimestre más lluvioso del año promedia 19.57 °C (IC 95%

± 0.46), mientras que la precipitación acumulada en ese período promedia 210.23 mm (IC 95% ± 19.73).

Los valores futuros de esas variables se obtuvieron a partir de las predicciones de los modelos de circulación general más recientes del Programa Mundial de Investigación del Clima (modelos CMIP6). Sin embargo, dado que se han desarrollado más de 100 modelos CMIP6 que difieren en su sensibilidad climática de equilibrio (ECS) –un parámetro que indica la respuesta térmica del sistema terrestre ante aumentos en las concentraciones de gases de efecto invernadero– sus predicciones del clima futuro varían (Knutti et al., 2017). Para este estudio, seleccionamos tres modelos CMIP6 con objeto de incluir esa variabilidad, incluyendo la versión 5 del Modelo Canadiense del Sistema Terrestre (CanESM5), que tiene el ECS más alto (~ 5.6 °C), la versión 6 del Modelo de Investigación Interdisciplinaria del Clima (MIROC6), que tiene ECS intermedio (~ 2.6 °C), y la versión 8 del Cuarto Modelo Climático del Instituto de Matemáticas Numéricas de la Academia de Ciencias de Rusia (INM-CM4-8), que tiene el ECS más bajo (~ 1.8 °C) (Meehl et al., 2020).

Los valores de temperatura media del aire y de precipitación durante el trimestre más lluvioso del año predichos por esos tres modelos CMIP6 se obtuvieron de las capas climáticas globales que estiman para el periodo 2041-2060, que se obtuvieron de la plataforma WorldClim a una resolución espacial de ~ 20 km²/pixel (consultada el 19 de enero 2022 en <https://www.worldclim.org>). Las predicciones climáticas en WorldClim se realizan considerando cuatro niveles de forzamiento radiativo que indican la diferencia entre la energía que ingresa al sistema terrestre y la que éste devuelve al espacio (2.6, 4.5, 7.0 y 8.5 W/m²), donde incrementos en el forzamiento radiativo implica mayores cambios climáticos debido a concentraciones atmosféricas más altas

de gases de efecto invernadero (Meinshausen et al., 2020). Las capas de los tres modelos CMIP6 se visualizaron en Quantum GIS 3.22 (disponible en <https://qgis.org>) y, para los cuatro niveles de forzamiento radiativo, los valores predichos de las dos variables de interés se extrajeron para las coordenadas geográficas del sitio de estudio. Después, estos valores se promediaron entre los tres modelos CMIP6 para cada nivel de forzamiento radiativo para obtener una predicción que integre la variabilidad de esas predicciones (Tabla 1). Al calcularse la diferencia entre los valores actuales y futuros de esas variables durante el trimestre más lluvioso del año en el corto plazo (2041-2060), se estima que la temperatura media del aire se incrementará entre 0.61 y 1.83 °C, mientras que la precipitación disminuirá entre 5.03% y 5.82% (Tabla 1). Estos valores, sugieren que las condiciones de aridez se intensificarán en el área de estudio y, por lo tanto, se empelaron como referencia para simular las condiciones de cambio climático en campo.

Tabla 1. Valores de temperatura media del aire y de precipitación en el trimestre más lluvioso del año predichos para el período 2041-2060 por los tres modelos CMIP6 considerados en este estudio (CanESM5, MIORC6 e INM-CM4-8) a cuatro niveles de forzamiento radiativo (2.6, 4.5, 7.0 y 8.5 W/m²). La tabla también muestra los promedios (\pm IC 95%) de esos valores entre esos tres modelos y la diferencia entre esos valores y los valores actuales de las variables climáticas (símbolos menos delante de ellos valores indican disminuciones en los mismos).

Variable climática	Forzamiento radiativo	Modelo CMIP6			Promedio	Diferencia
		CanESM5	MIORC6	INM-CM4-8		
Temperatura media del aire (°C)	2.6 W/m ²	20.83	20.73	20.60	20.72 \pm 0.13	0.60
	4.5 W/m ²	21.93	21.90	21.00	21.61 \pm 0.60	1.49
	7.0 W/m ²	22.28	20.95	21.30	21.51 \pm 0.78	1.39
	8.5 W/m ²	22.53	22.07	21.40	22.00 \pm 0.64	1.88
Precipitación (mm)	2.6 W/m ²	225.00	188.00	186.00	199.67 \pm 24.85	-5.03%
	4.5 W/m ²	227.00	183.00	187.00	199.00 \pm 27.53	-5.34%
	7.0 W/m ²	224.00	187.00	183.00	198.00 \pm 25.58	-5.82%
	8.5 W/m ²	224.00	184.00	190.00	199.33 \pm 24.41	-5.18%

Diseño experimental

Para el experimento, en el sitio de estudio se seleccionaron aleatoriamente 20 puntos experimentales manteniendo una distancia mínima de 5 m entre ellos. En todos los puntos experimentales se removió la vegetación herbácea y arbustiva presente, para luego labrar el suelo con palas trazando surcos de 50 cm de largo por 10 cm de profundidad, espaciados 30 cm entre ellos. La mitad de estos puntos fue asignada a parcelas de control que permanecieron bajo el clima actual, mientras que la otra mitad fue asignada a parcelas donde se simuló el incremento en aridez esperado a mediados de siglo.

En los puntos experimentales asignados a las parcelas de simulación de cambio climático (de aquí en adelante, parcelas SCC), la temperatura se incrementó con cámaras de techo abierto hexagonales (Marion et al., 1997). Estas estructuras se construyeron con láminas trapezoidales de acrílico transparente, con un diámetro de 2.08 m en su base y de 1.50 en su parte superior (Figura 2). Estudios previos desarrollados en la región de estudio demostraron que estas cámaras pueden incrementar la temperatura promedio del aire entre 1.1 y 2.0 °C, en relación con la temperatura exterior (Aragón-Gastélum et al., 2017; Guerra-Coss et al., 2021), que son valores dentro de los rangos predichos por los modelos CMIP6 en el sitio de estudio (Tabla 1). Para disminuir la precipitación se implementaron refugios de lluvia sobre las cámaras de techo abierto, los que consistían en canaletas de policarbonato transparente sujetadas a marcos metálicos sostenidos a 1.2 m del suelo (Yahdjian & Sala, 2002). La cantidad de agua de lluvia interceptada por estas estructuras depende de la cantidad de canaletas que las compongan, habiéndose demostrado que disminuyen la precipitación entre un 8% y un 12% con cinco canaletas (Badano & Sánchez-Montes de Oca, 2022;

Pérez-Ruiz et al., 2018; Sandoval-Martínez et al., 2022). Debido a que esto sobrepasa los niveles de intercepción de lluvia requeridos para este estudio, los refugios de lluvia implementados en campo consistieron en solamente cuatro canaletas (Figura 2). Finalmente, la parte superior de las cámaras de techo abierto de las parcelas SCC fue cubierta con una malla de alambre hexagonal (1.3 cm de apertura) para impedir el acceso de depredadores de semillas, mientras que las parcelas de control solamente fueron cercadas con malla de alambre para este fin.



Figura 2. Parcelas de simulación de cambio climático (izquierda), donde se incrementó la temperatura con cámaras de techo abierto y se redujo la precipitación con refugios de lluvia, y parcelas de control cercadas con malla de alambre (derecha). Los dispositivos en que se visualizan en el interior de las parcelas son los sensores automatizados para el registro de la precipitación y de la temperatura y humedad relativa del aire.

Variables de respuesta

Una vez montadas las parcelas experimentales en el sitio de estudio, el 10 de agosto de 2022 se sembraron 25 semillas de maíz Cónico Norteño en cada. Las semillas estuvieron distanciadas 10 cm entre ellas, lo que coincide con la densidad de siembra de este cultivo. Esta fecha de siembra es tardía, en comparación con las fechas en que usualmente se siembra el maíz en la región, lo que se debió a que en el año 2022 el inicio de la temporada de lluvias se retrasó hasta agosto. Las posiciones de siembra de las semillas fueron marcadas dentro de las parcelas experimentales con pequeñas

estacas numeradas y se monitoreó la emergencia del coleóptilo cada tres días, como también la supervivencia de las plantas resultantes, hasta el 09 de octubre de ese año (60 días en total).

Para establecer si las cámaras de techo abierto y los refugios de lluvia simulaban adecuadamente las condiciones de cambio climático esperadas a mediados de este siglo, tanto en parcelas SCC como en controles se monitorearon condiciones microclimáticas durante todo el experimento. Para esto, en todas las parcelas se instalaron sensores automatizados de temperatura del aire (HOBO U23-Pro-V2, Onset Computer Corporation, EE. UU.) fijados en estacas de madera a 20 cm del suelo, los que fueron programados para registrar los valores esta variable cada una hora. Además, se seleccionaron aleatoriamente cinco parcelas experimentales de cada tratamiento climático y en ellas se instalaron pluviómetros automatizados (HOBO S-RGB-M002, Onset Computer Corporation, EE. UU.) programados para medir la precipitación en cada evento de lluvia. En todas las unidades experimentales, también se midió el contenido volumétrico de agua en el suelo. Estas mediciones se realizaron cada tres días, coincidiendo con las fechas de monitoreo de emergencia y supervivencia de plantas, empleando un reflectómetro en dominio del tiempo (TDR Field Scout 300, Spectrum Technologies, EE.UU.). En cada fecha de monitoreo, el contenido volumétrico de agua en el suelo se midió en puntos aleatorios dentro de cada parcela y los datos obtenidos fueron promediados.

El 10 de octubre de 2022, una vez finalizados los monitoreos de supervivencia de las plantas, sobre las hojas de los individuos sobrevivientes se midió la fluorescencia de la clorofila con un fluorómetro portátil (Y-II-meter, Opti-Sciences, EE.UU.). La fluorescencia de la clorofila ocurre cuando las plantas reemiten fotones al medio para

disipar los excesos de energía lumínica cosechada por los fotosistemas y suele incrementarse en plantas sometidas a estrés ambiental, entendiendo este concepto como cualquier factor que disminuya el desempeño de los individuos, ya que esto reduce la eficiencia con que la cadena transportadora de electrones de la membrana del tilacoides (en los cloroplastos) acepta esa energía (Govindjee, 2004). Por lo tanto, medir la fluorescencia de la clorofila permite estimar y comparar respuestas funcionales entre plantas sometidas a diferentes condiciones ambientales (Adams & Demmig-Adams, 2004).

En este estudio, esas mediciones de fluorescencia se realizaron en cuatro momentos del día (04:00, 09:00, 14:00 h y 19:00 h) sobre cinco plantas seleccionadas aleatoriamente dentro de cada parcela experimental. En las unidades experimentales donde sobrevivieron menos de cinco individuos, las mediciones se realizaron en todos los individuos. La información colectada antes del amanecer (04:00 h) se usó para estimar la cosecha cuántica máxima del fotosistema II (F_v/F_m), ya que esto sólo es posible en hojas adaptadas a la oscuridad. Los valores de esta variable se estimaron como $F_v/F_m = (F_m - F_0)/F_m$, donde F_0 es la fluorescencia emitida por las hojas en oscuridad cuando se excitan con un pulso de luz actínica de baja intensidad ($\sim 50 \mu\text{mol fotones m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), mientras que F_m es la fluorescencia máxima emitida por esas hojas cuando se aplica un pulso de luz actínica saturante ($\sim 2500 \mu\text{mol fotones m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Las mediciones realizadas durante horas de luz (09:00, 14:00 h y 19:00 h) se usaron para calcular la cosecha cuántica efectiva del fotosistema II (ϕ_{PSII}) como $\phi_{PSII} = (F'_m - F_s)/F'_m$, donde F_s es la fluorescencia basal emitida por la clorofila bajo iluminación ambiental continua, mientras que F'_m es su fluorescencia máxima cuando

se sobrepone un pulso de luz actínica saturante ($\sim 2500 \mu\text{mol fotones m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) a la iluminación ambiental. Dado que los valores de F_0 y F_s se aproximan a los valores de F_m y F'_m , respectivamente, conforme aumenta el estrés ambiental, esto resulta en menores valores F_v/F_m y de ϕ_{PSII} (Maxwell & Johnson, 2000).

Además de la reemisión de fotones, las plantas también pueden disipar los excesos de energía lumínica cosechados por los fotosistemas como calor a través del ciclo de las xantofilas (Maxwell & Johnson, 2000). Este mecanismo se conoce como apagamiento no-fotoquímico de la fluorescencia (NPQ) y su magnitud se estima como $NPQ = F'_m/F_m$ (Adams et al., 2008). Además, dado que el fluorómetro empleado mide la densidad de flujo de fotones fotosintéticos ($PPFD$) alrededor de las hojas, también se calculó la tasa de transporte de electrones en la membrana del tilacoide (ETR) como $ETR = PPFD \times \phi_{PSII} \times 0.84 \times 0.5$, donde 0.84 y 0.5 son constantes que indican la fracción de luz cosechada por el fotosistema II y el fotosistema I, respectivamente. En general, se espera que los valores NPQ se incrementen y los valores ETR disminuyan conforme aumenta el estrés ambiental, indicando un menor desempeño fotosintético de las plantas (Baker & Oxborough, 2004). Como variables adicionales, con el fluorómetro también se midió la temperatura foliar y del ambiente en torno a las hojas para corroborar si esos valores eran efectivamente superiores en las parcelas SCC que en los controles.

Tras realizar las mediciones anteriores, las plantas fueron cosechadas. Para esto, se excavó cuidadosamente alrededor de ellas para retirarlas enteras, con tallo y la raíz, y se colocaron individualmente en bolsas plásticas para ser transportadas al laboratorio, donde se lavaron con agua corriente para retirar restos de tierra. Después, se realizó un

corte transversal en el cuello de las plantas (zona donde se unen el tallo y la raíz) para separar el tallo (incluyendo las hojas) de las raíces. Estas estructuras se colocaron en bolsas de papel individuales y se secaron en una estufa de aire forzado a 60 °C, siendo pesadas cada 24 horas en una balanza analítica (Cubis model, Sartorius, Alemania; precisión de 0.01 mg) hasta que su biomasa (peso seco) permaneció constante. Con estos valores se estimaron las tasas de crecimiento del tallo y la raíz, como también de la planta completa, como razón entre la biomasa de cada estructura y la edad de cada planta (días transcurridos entre su emergencia y su cosecha), calculándose además la proporción raíz:tallo. En general, sería de esperar que plantas sometidas condiciones de mayor aridez crezcan más lentamente y prioricen el desarrollo de la raíz sobre el desarrollo del tallo con objeto de maximizar la captura de agua del suelo (Jackson et al., 1999).

Análisis estadísticos

Los datos de temperatura del aire recopilados por cada sensor climático se promediaron en intervalos de tres días a lo largo del experimento, mientras que los datos de precipitación registrados por los pluviómetros se acumularon sobre esos mismos períodos. Con esta información se realizaron ANDEVAs de medidas repetidas de una vía para establecer si los valores de estas variables diferían entre tratamientos climáticos. Debido a que en algunos períodos no ocurrieron eventos de lluvia, y debido a que las pruebas estadísticas empleadas no admiten grupos con varianza cero (Zar, 2010), en el análisis de los datos de precipitación se excluyeron aquellos períodos en que no se registraron valores de esta variable. El contenido volumétrico de agua en el

suelo también se comparó con estos análisis, empleándose directamente los valores registrados cada tres días.

Para las plantas de maíz se estimaron las tasas de emergencia y supervivencia cada tres días empleando el método de Kaplan-Meier (Kaplan & Meier, 1958), las cuales fueron comparadas entre tratamientos climáticos durante el experimento con análisis de tiempo de falla (Kleinbaum & Klein, 2005). Con relación a estos análisis, es importante aclarar que las tasas de emergencia fueron calculadas considerando todas semillas sembradas en cada tratamiento climático (falla = emergencia del coleóptilo), mientras que el cálculo de las tasas supervivencia solamente consideró las semillas que dieron origen a plantas (falla = muerte de la planta).

De las variables medidas con el fluorómetro, la primera que se comparó entre tratamientos climáticos fue *PPFD* para establecer si las cámaras de techo abierto y/o los refugios de lluvia reducían la cantidad de radiación lumínica al interior de las parcelas SCC. Esto se hizo porque se debía asegurar que las plantas de los controles y de las parcelas SCC estaban sometidas a condiciones lumínicas equivalentes para que las variables derivadas de las mediciones de fluorescencia de la clorofila fueran comparables entre tratamientos. Para esto, se empleó un ANDEVA de medidas repetidas de una vía, donde los momentos de medición a lo largo día constituyeron las repeticiones. Posteriormente, los valores F_v/F_m , ϕ_{PSII} , *NPQ* y *ETR* se compararon entre tratamientos climáticos con este mismo tipo de análisis, al igual que la temperatura foliar y la temperatura del ambiente que rodea a las hojas. Finalmente, las tasas de crecimiento de tallos, raíces y plantas completas, como también sus razones raíz:tallo, se compararon entre tratamientos climáticos con pruebas *t*-Student.

RESULTADOS

Simulación de cambio climático

La temperatura promedio del aire en las parcelas SCC fue 1.45 °C más alta que en los controles (20.48 °C ± 0.24 95% IC vs. 19.03 °C ± 0.30 95% IC) y se encontraron diferencias significativas entre estos valores ($F_{(1,18)} = 54.417$, $p < 0.001$). La temperatura varió a lo largo del experimento ($F_{(19,342)} = 54.417$, $p < 0.001$) y se detectaron efectos interactivos entre el tiempo y los tratamientos climáticos ($F_{(19,342)} = 6.317$, $p < 0.001$). Esto se reflejó en diferencias de temperatura más amplias entre parcelas SCC y controles en los períodos más calurosos del experimento (Figura 3).

La precipitación acumulada durante el período experimental fue 6.3% más baja en las parcelas SCC que en los controles (78.48 mm ± 1.46 95% IC vs. 83.72 ± 1.92 95% IC) y esta diferencia fue estadísticamente significativa ($F_{(1,8)} = 18.102$, $p = 0.003$). Aunque los valores de precipitación variaron a lo largo del experimento ($F_{(11,88)} = 1094.702$, $p < 0.001$), no se detectaron efectos interactivos entre el tiempo y los tratamientos climáticos ($F_{(11,88)} = 0.645$, $p = 0.785$). Esto indica que las diferencias en la cantidad de lluvia entre parcelas SCC y controles fueron constantes a lo largo del experimento (Figura 3).

El promedio del contenido volumétrico de agua en el suelo fue 15.81% (95% IC ± 0.64) en las parcelas control y 12.22% en las parcelas SCC (95% IC ± 0.47), detectándose diferencias significativas entre tratamientos climáticos ($F_{(1,18)} = 78.812$, $p < 0.001$). Estos valores variaron a lo largo del tiempo ($F_{(19,342)} = 518.312$, $p < 0.001$), siendo más altos en los períodos más lluviosos (Figura 3). Sin embargo, no se detectó interacción entre el tiempo y los tratamientos climáticos ($F_{(19,342)} = 1.446$, $p = 0.103$),

lo que indica que las diferencias en contenido volumétrico de agua entre parcelas SCC y controles fueron constantes a lo largo del experimento.

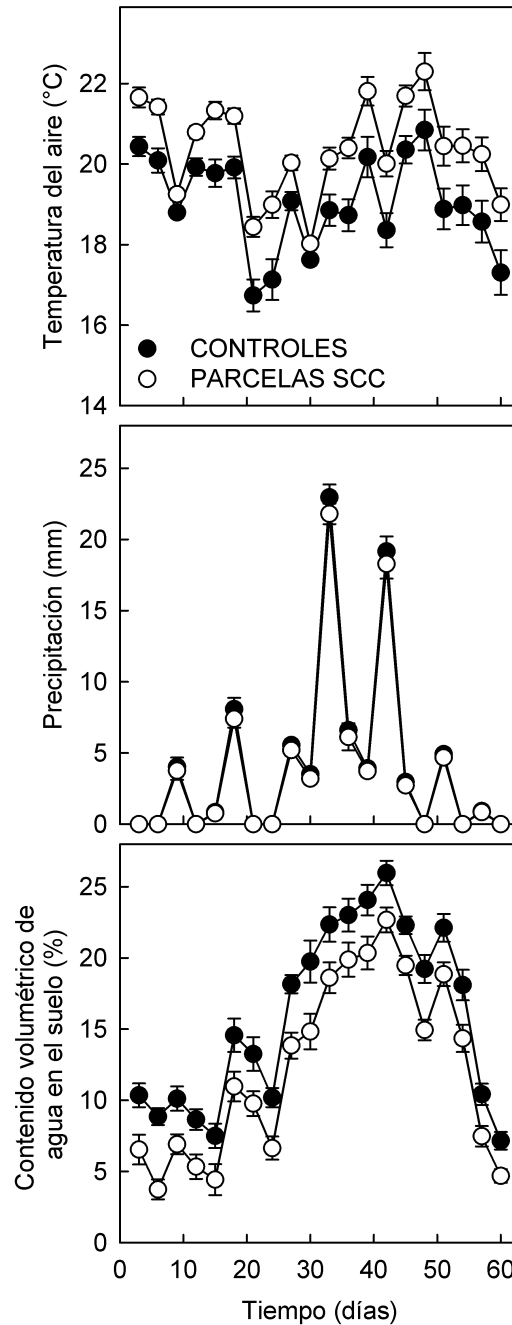


Figura 3. Promedios (\pm 95% IC) de la temperatura del aire, la precipitación y el contenido volumétrico de agua en el suelo registrados en períodos de tres días en las parcelas control (símbolos negros) y en las parcelas donde se indujeron condiciones de cambio climático (símbolos blancos).

Respuestas del maíz Cónico Norteño ante condiciones de aridez intensificadas

Las tasas de emergencia de plántulas de maíz Cónico Norteño en las parcelas control se incrementaron a lo largo de los primeros 12 días del experimento y luego se estabilizaron alrededor del 56%, mientras que en las parcelas SCC se estabilizaron alrededor del 80% a los 15 días (Figura 4). Las tasas de emergencia de plántulas difirieron significativamente entre tratamientos climáticos (estadístico de Gehan-Wilcoxon = 8.388, GL = 1, $p < 0.001$), observándose que las semillas sembradas en las parcelas SCC daban lugar a las plántulas más rápidamente que las semillas sembradas en las parcelas control (Figura 4).

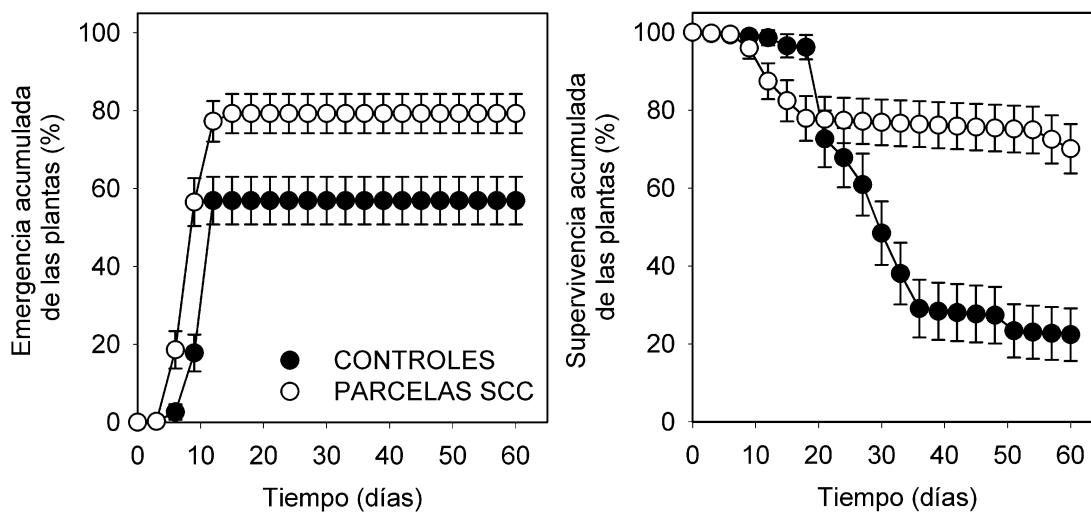


Figura 4. Tasas de emergencia y supervivencia (promedios \pm 95% IC) de las plantas de maíz Cónico Norteño a través del tiempo en las parcelas control (símbolos negros) y en las parcelas donde se indujeron condiciones de cambio climático (símbolos blancos).

Las tasas de supervivencia de las plantas también difirieron significativamente entre tratamientos climáticos (estadístico de Gehan-Wilcoxon = 26.11, GL = 1, $p < 0.001$). En las parcelas SCC, las tasas de supervivencia de plantas disminuyeron rápidamente durante los primeros 18 días del experimento, pero tras este período disminuyeron de

manera menos pronunciada hasta alcanzar el 70% al final del experimento (Figura 4). En las parcelas control, en cambio, se observó una caída abrupta de las tasas de supervivencia de las plantas de maíz hasta los 36 días del experimento, para luego disminuir paulatinamente hasta alcanzar el 22% (Figura 4).

Aunque *PPDF* varió a través de tiempo, estos valores no difirieron entre tratamientos climáticos en ningún momento del día en que se llevaron a cabo las mediciones de fluorescencia de la clorofila (Tabla 2), indicando las mismas se realizaron bajo condiciones lumínicas similares en controles y parcelas SCC. Las demás variables medidas con el fluorómetro difirieron entre tratamientos climáticos y fluctuaron a lo largo del día, detectándose también efectos interactivos entre esos dos factores (Tabla 2). Tanto la temperatura foliar como la del ambiente que rodeaba a las hojas fue más alta en las parcelas SCC que en los controles, lo que indica que los efectos de calentamiento inducidos con las cámaras de techo abierto efectivamente se trasladaron a las plantas (Figura 5).

La cosecha cuántica máxima del fotosistema II (F_v/F_m), medida en hojas adaptadas a la oscuridad (04:00 h), fue mayor en las parcelas SCC que en los controles (Figura 5). En las mediciones realizadas sobre plantas expuestas a luz solar, en ambos tratamientos climáticos se observó una disminución de la cosecha cuántica efectiva del fotosistema II (ϕ_{PSII}) conforme aumentó *PPDF* (de las 09:00 a las 14:00 h), pero estos valores siempre fueron más altos en las parcelas SCC que en los controles (Figura 5). Los valores ϕ_{PSII} se volvieron a incrementar hacia el atardecer (19:00 h), pero en este momento del día se registró la mayor diferencia en los valores de esta variable entre plantas de los controles y plantas de las parcelas SCC (Figura 5).

Tabla 2. Resultados de los ANOVA de medidas repetidas con que se comparó entre tratamientos climáticos a lo largo del día la densidad del flujo de fotones fotosintéticos que impactaba sobre las hojas de las plantas de maíz Cónico Norteño (*PPDF*), la cosecha cuántica del fotosistema II (F_v/F_m y ϕ_{PSII}), apagamiento no-fotoquímico de la fluorescencia de la clorofila (*NPQ*), tasa relativa de transporte de electrones (*ETR*), la temperatura foliar (FT°) y la temperatura en el ambiente en torno a las hojas (ET°). La tabla muestra las fuentes de variación incluidas en cada análisis y los estadísticos correspondientes (valor crítico de $\alpha = 0.05$).

Variable analizada	Fuente de variación	Resultados estadísticos
<i>PPDF</i>	Tratamientos climáticos	$F_{(1,79)} = 0.453$, $p = 0.503$
	Tiempo	$F_{(3,237)} = 14414.460$, $p < 0.001$
	Interacción entre factores	$F_{(3,237)} = 0.116$, $p = 0.891$
F_v/F_m y ϕ_{PSII}	Tratamientos climáticos	$F_{(1,79)} = 131.439$, $p < 0.001$
	Tiempo	$F_{(3,237)} = 358.479$, $p < 0.001$
	Interacción entre factores	$F_{(3,237)} = 22.620$, $p < 0.001$
<i>NPQ</i>	Tratamientos climáticos	$F_{(1,79)} = 125.904$, $p < 0.001$
	Tiempo	$F_{(3,237)} = 164.281$, $p < 0.001$
	Interacción entre factores	$F_{(3,237)} = 78.236$, $p < 0.001$
<i>ETR</i>	Tratamientos climáticos	$F_{(1,79)} = 100.361$, $p < 0.001$
	Tiempo	$F_{(3,237)} = 1117.461$, $p < 0.001$
	Interacción entre factores	$F_{(3,237)} = 81.287$, $p < 0.001$
FT°	Tratamientos climáticos	$F_{(1,79)} = 56.440$, $p < 0.001$
	Tiempo	$F_{(3,237)} = 924.655$, $p < 0.001$
	Interacción entre factores	$F_{(3,237)} = 3.238$, $p = 0.023$
ET°	Tratamientos climáticos	$F_{(1,79)} = 138.292$, $p < 0.001$
	Tiempo	$F_{(3,237)} = 2551.355$, $p < 0.001$
	Interacción entre factores	$F_{(3,237)} = 3.794$, $p = 0.011$

Tanto en controles como en parcelas SCC, las plantas realizaron una mayor disipación energética en forma de calor (*NPQ*) en los momentos del día en que estuvieron expuestas a mayores niveles de *PPDF*, pero los valores de esta variable fueron siempre más altos en las parcelas SCC que en los controles (Figura 5). De igual manera, la tasa de transporte de electrones (*ETR*) de las plantas se incrementó con *PPDF* y fue más alta en las parcelas SCC que en los controles, aunque esta diferencia entre tratamientos climáticos solamente fue evidente en el momento que las plantas estuvieron expuestas a altos niveles de radiación solar (Figura 5).

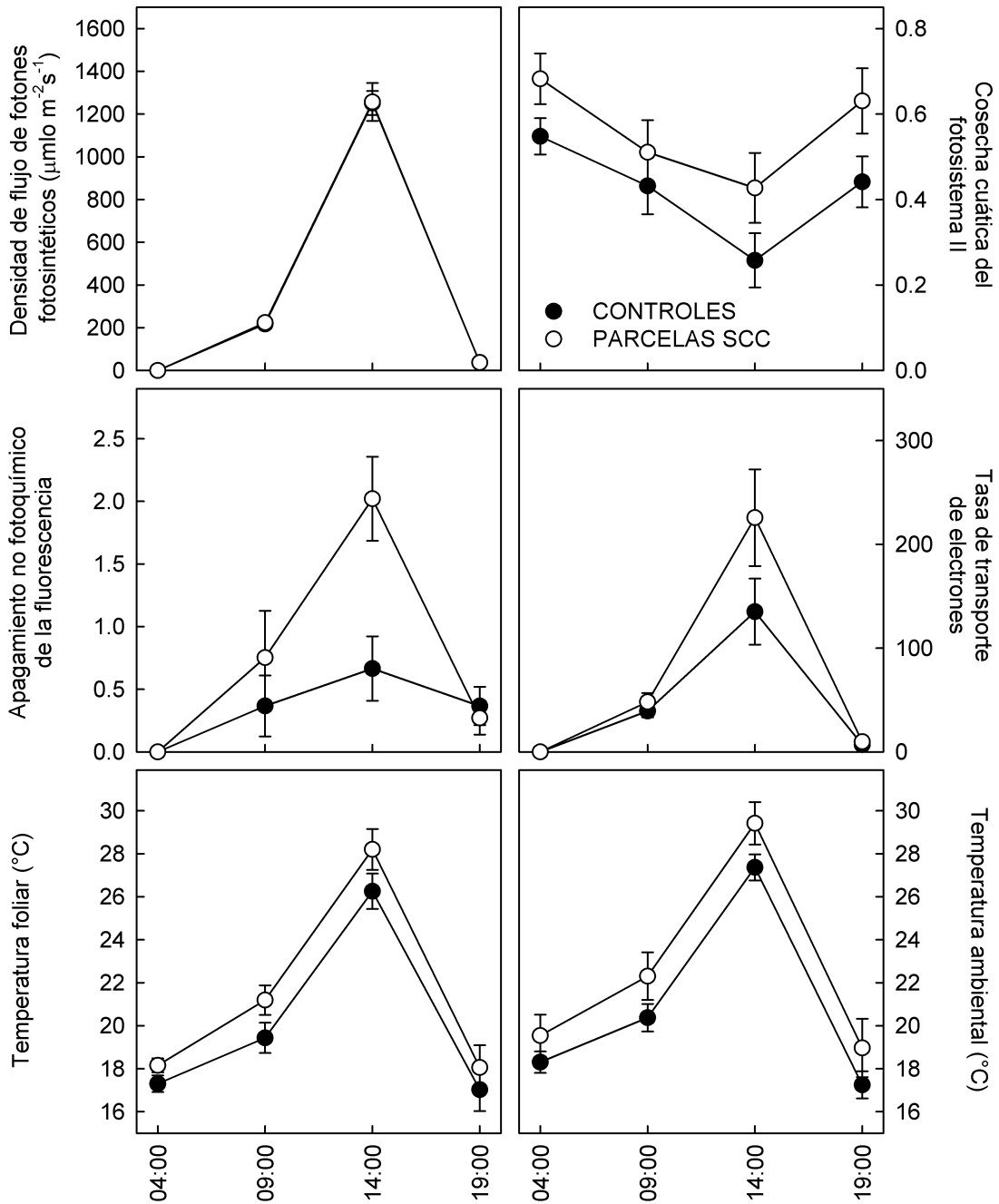


Figura 5. Variables medidas con el fluorómetro sobre las hojas de plantas de maíz Cónico Norteño desarrolladas en los controles bajo el clima actual (símbolos negros) y las parcelas SCC (símbolos blancos).

Las tasas netas de crecimiento del tallo, de la raíz y de la planta completa fueron significativamente mayores en las parcelas SCC que en los controles (Tabla 3), lo que indica que las condiciones de cambio climático estimulan el crecimiento de las plantas

de maíz. La proporción raíz:tallo, por otra parte, fue menor en las parcelas SCC que en los controles (Tabla 3), indicando que las condiciones de cambio climático tienden a priorizar el crecimiento del brote aéreo sobre el desarrollo de las raíces.

Tabla 3. Tasas netas de crecimiento del tallo, de la raíz y de la planta completa, como también de la relación raíz:tallo, en las parcelas control y de simulación de cambio climático. Los valores en el cuerpo de la tabla son promedios (en mg/día \pm 95% IC) y también se muestran los resultados estadísticos de las pruebas t-Student realizadas para comparar esos valores entre tratamientos climáticos (valor crítico de $\alpha = 0.05$).

Variable de respuesta	Controles	Parcelas SCC	Resultados estadísticos
Tasa de crecimiento del tallo	9.629 \pm 0.967	38.486 \pm 0.822	t = 43.756, GL = 79, p < 0.001
Tasa de crecimiento de la raíz	4.273 \pm 0.425	10.730 \pm 0.400	t = 20.812, GL = 79, p < 0.001
Tasa de crecimiento de la planta	13.901 \pm 1.375	49.216 \pm 1.072	t = 39.794, GL = 79, p < 0.001
Razón raíz:tallo	0.448 \pm 0.013	0.279 \pm 0.009	t = 20.676, GL = 79, p < 0.001

DISCUSIÓN

Simulación de aridez mediada por cambio climático

La temperatura registrada en las parcelas control fue muy cercana a la normal climatológica reportada para el trimestre más lluvioso del año. Esto indica que las condiciones de temperatura en esas parcelas experimentales correspondieron con las que históricamente ocurren durante el ciclo de cultivo del maíz Cónico Norteño en la región de estudio. La implementación de cámaras de techo abierto en las parcelas SCC permitió incrementar la temperatura a los niveles esperados a mediados de siglo (período 2041-2060) con forzamientos radiativos entre 4.5 y 7.0 W/m² (~1.45 °C más alta que en la actualidad). Este calentamiento se transfirió de manera efectiva a las plantas de maíz de las parcelas SCC, las que presentaron temperaturas foliares más altas que aquellas de los controles. Estas evidencias permiten sugerir que las plantas de maíz en las parcelas SCC se desarrollaron bajo temperaturas correspondientes a un calentamiento moderado durante el trimestre más lluvioso del año.

La precipitación registrada en los controles fue un 60% inferior a la normal climatológica reportada para el trimestre más lluvioso del año. En este aspecto, cabe destacar que la región de estudio presenta una alta vulnerabilidad a la sequía debido a una amplia variabilidad interanual en la precipitación, la que en un año seco puede ser de cuatro a diez veces menor que en un año lluvioso (Ortega-Gaucin et al., 2018; Rocha-Escalante et al., 2022). Estos resultados indican que el experimento se realizó en un año extremadamente seco en el cual, además, la implementación de refugios de lluvia en las parcelas SCC disminuyó la precipitación a niveles inferiores a los esperados en cualquier escenario de cambio climático. Por lo tanto, se puede sugerir

que las plantas de maíz que se desarrollaron en las parcelas SCC estuvieron sometidas a condiciones de sequía más intensas que las predichas por los modelos de circulación general CMIP6 empleados para estimar el clima futuro en el sitio de estudio.

Los menores contenidos volumétricos de agua en el suelo registrados en las parcelas SCC, en comparación con los controles, probablemente se debieron al efecto combinado de las cámaras de techo abierto y los refugios de lluvia. En este sentido, la mayor temperatura inducida en esas parcelas experimentales pudo haber incrementado la evaporación de agua en el suelo, mientras que una menor precipitación redujo la recarga de agua en el sustrato (Parlange et al., 1998). Así, las plantas de maíz desarrolladas en las parcelas SCC estuvieron sometidas a condiciones de aridez más intensas que las que originalmente se pretendía inducir en estas unidades experimentales.

Respuestas del maíz Cónico Norteño desarrollado en condiciones de aridez intensificadas

Contrario a nuestras expectativas, las plantas de maíz Cónico Norteño presentaron mayores tasas de emergencia y supervivencia en las parcelas donde se simularon condiciones de cambio climático que en los controles bajo el clima actual. Estudios desarrollados con las principales variedades mejoradas de maíz que se cultivan en África, Europa, Norteamérica, y Sudamérica demostraron que el rango de temperatura óptimo para la germinación de esta especie oscila entre 26 y 29 °C (Riley, 1981; Xue et al., 2021), mientras que temperaturas entre 27 y 32 °C son óptimas para el desarrollo del tallo, la raíz y las hojas (Sánchez et al., 2014; Waqas et al., 2021). En este caso, tanto en controles como en parcelas SCC, la temperatura siempre estuvo por debajo de

esos umbrales mínimos para la germinación y crecimiento óptimo. Sin embargo, los resultados indicaron que el calentamiento inducido con cámaras de techo abierto aceleró la emergencia de plántulas del maíz Cónico Norteño, dando lugar a un tercio más de plantas en las parcelas SCC que en los controles. Por otra parte, las tasas netas de crecimiento del tallo y de la raíz, y en consecuencia de las plantas completas, fueron entre dos y cuatro veces más altas en las parcelas SCC que en los controles. Esta mayor acumulación de biomasa en menos tiempo probablemente dio lugar a plantas más vigorosas –es decir, menos susceptibles a las vicisitudes ambientales (Ellis, 1992)– y este efecto pudiera ser responsable, al menos parcialmente, de su mayor supervivencia bajo condiciones de cambio climático.

En cuanto a la demanda hídrica del maíz, nuestros resultados contradicen lo reportado para variedades comerciales mejoradas con ciclos de cultivo largos. En esas variedades, el crecimiento de las plantas y el rendimiento de las cosechas se reducen conforme disminuye la precipitación, especialmente cuando cae por debajo de los 200 mm durante la temporada de lluvias (Bocchiola et al., 2013; Cudjoe et al., 2021; Kimm et al., 2020; Salinger et al., 2022). No obstante, también se ha indicado que una precipitación superior a los 350 mm durante el ciclo de cultivo puede, igualmente, perjudicar su desarrollo (Rashid & Rasul, 2011). En este caso, la precipitación en los controles siquiera llegó a los 90 mm durante el trimestre más lluvioso del año, mientras que en las parcelas SCC apenas rebasó los 75 mm debido a la interferencia de los refugios de lluvia. Sin embargo, aun cuando en las parcelas SCC se generaron condiciones de aridez más intensas en un año extremadamente seco, la emergencia, la supervivencia y el crecimiento de las plantas fue mayor en esas unidades experimentales que en los controles. Estos resultados sugieren, por una parte, que la

raza de maíz Cónico Norteño, de ciclo de cultivo corto, tiene una tolerancia a la sequía muy elevada y, por otra parte, que la reducción en la precipitación inducida en las parcelas SCC, que alcanzó niveles ligeramente superiores a los esperados a mediados de siglo, no tuvo efectos substanciales sobre el desarrollo de las plantas. Esto lleva a proponer que el principal factor que determinó que las plantas tuvieran mayores tasas de emergencia, supervivencia y crecimiento bajo condiciones simuladas de cambio climático fue el incremento de la temperatura inducido con cámaras de techo abierto.

Las mayores tasas de supervivencia y crecimiento del maíz Cónico Norteño en las parcelas SCC pudieran vincularse a una serie de respuestas funcionales que presentaron esas plantas, como es el caso de la cosecha cuántica máxima del fotosistema II (F_v/F_m). Dado que esta variable se estima midiendo la fluorescencia de la clorofila cuando los centros de reacción de los fotosistemas están inactivos (en oscuridad), permite estimar si el estrés ambiental ha causado daños a los mismos. La mayoría de las especies vegetales tienen razones F_v/F_m próximas a 0.8 cuando los efectos del estrés ambiental son negligibles, lo que indica que la capacidad de sus fotosistemas para procesar energía lumínica es cercana a la máxima, pero estos valores disminuyen a medida que los efectos del estrés ambiental se hacen más pronunciados (Adams & Demmig-Adams, 2004; Maxwell & Johnson, 2000). En este caso, aunque las plantas de las parcelas SCC tuvieron valores F_v/F_m por debajo de 0.8, los mismos estuvieron más cercanos a este óptimo que aquellas de los controles. Esto sugiere que el clima actual impone al maíz Cónico Norteño mayores niveles de estrés ambiental que las condiciones de humedad y temperatura esperadas a mediados de este siglo. Los menores valores F_v/F_m registrados sobre las plantas de los controles son respuestas

típicas de cultivos sometidos a estrés hídrico y/o térmico, donde la exposición constante a condiciones de temperatura y humedad por encima o por debajo de los niveles óptimos para su desarrollo puede causar daños permanentes en los fotosistemas (Fracheboud & Leipner, 2003). Debido a la elevada tolerancia a la sequía que se registró en este estudio para el maíz Cónico Norteño, en términos de su emergencia, supervivencia y crecimiento en las parcelas SCC, es posible que los menores niveles de lluvia y humedad del suelo inducidos con los refugios de lluvia no sean muy relevantes para explicar esos resultados. En cambio, es más probable que los mayores valores F_v/F_m en las parcelas SCC se hayan debido a que las cámaras de techo abierto generaron condiciones térmicas más cercanas a las óptimas para el desarrollo de las plantas, permitiéndoles mantener una mayor integridad estructural de sus fotosistemas en los momentos del experimento en que estuvieron sometidas a mayor estrés ambiental.

El menor daño a los fotosistemas sufrido por las plantas de las parcelas SCC pudiera explicar sus mayores valores de cosecha cuántica efectiva (ϕ_{PSII}) en los momentos del día en que estuvieron expuestas a la luz y, en consecuencia, sus mayores tasas relativas de transporte de electrones en la membrana del tilacoide (ETR). Estas dos variables son críticas para el proceso de fotosíntesis, ya que están relacionadas positivamente con la capacidad de las plantas para generar las moléculas energéticas (ATP y NADPH) requeridas para asimilar el carbono atmosférico (CO_2) en el ciclo de Calvin (Baker & Oxborough, 2004; Bazzaz & Cavendar-Bares, 2004; Khamis et al., 1990). Sobre este punto es importante notar que, tanto en parcelas SCC como en controles, los valores de ϕ_{PSII} y ETR disminuyeron después del mediodía, cuando la temperatura y la radiación

solar (*PPDF*) fueron más altas. Esto probablemente se atribuyó a la “depresión del mediodía en la asimilación de carbono” que ocurre durante el período más caliente del día, cuando la mayoría de las especies de plantas reducen su captura de CO₂ debido al cierre estomático para reducir la pérdida de agua por transpiración, lo que lleva a la inactivación de parte de los centros de reacción de los fotosistemas para reducir al flujo de electrones en la membrana tilacoidal (Ding et al., 2006; Huang et al., 2006). En consecuencia, se incrementa la emisión de fluorescencia basal (F_s) como mecanismo para disipar el exceso de energía lumínica cosechada por las moléculas de clorofila y, así, evitar daños a los fotosistemas (Adams & Demmig-Adams, 2004; Martínez-Ferri et al., 2000). En esta investigación, aún en los períodos más calientes del día, los valores de ϕ_{PSII} y *ETR* fueron mayores en las plantas de las parcelas SCC que en los controles y, en ambos casos, la inactivación de los centros de reacción de los fotosistemas tras la depresión del mediodía fue reversible, ya que al atardecer estos valores volvieron a aumentar en ambos tratamientos climáticos. Sin embargo, esta recuperación de los fotosistemas fue menor en los controles que en las parcelas SCC, lo que refuerza la propuesta de que los fotosistemas de las plantas de maíz Cónico Norteño cultivadas bajo el clima actual sufrirían más daño que cuando son cultivadas bajo condiciones de cambio climático, probablemente por tener menor capacidad para disipar los excesos de energía lumínica cosechada por la clorofila.

En comparación con las plantas desarrolladas bajo el clima actual, aquellas cultivadas bajo condiciones de cambio climático también presentaron mayor capacidad para disipar excesos de energía lumínica cosechados por la clorofila como calor a través del ciclo de las xantófilas. De hecho, los valores de apagamiento no-fotoquímico de la

fluorescencia de la clorofila (*NPQ*) durante el período del día en que la radiación solar fue más elevada, fueron casi ocho veces más altos en las plantas de las parcelas SCC que en las plantas de los controles. Por una parte, junto con los resultados de ϕ_{PSII} y *ETR*, esto sugiere que tanto las plantas de los controles como de parcelas SCC no emplean toda la energía lumínica cosechada durante el día por los fotosistemas para generar las moléculas energéticas requeridas para la asimilación de carbono (ATP y NADPH), ya que gran parte de la energía lumínica parece estar siendo disipada como fluorescencia o calor. Por otra parte, los elevados valores de *NPQ* en las parcelas SCC permiten proponer que las plantas desarrolladas bajo condiciones de cambio climático fueron más eficientes para disipar esos excesos de energía lumínica a través de ciclo de las xantófilas que aquellas desarrolladas bajo el clima actual. Aunque las variables basadas en fluorescencia de la clorofila medidas en este estudio no permiten determinar por qué estaría ocurriendo esto en las plantas de maíz Cónico Norteño, estudios desarrollados en otras especies vegetales sugieren que la expresión de los genes vinculados a las enzimas violaxantina de-epoxidasa (que cataliza la conversión de violaxantina a anteraxantina y, después, a zeaxantina cuando las plantas están sometidas a niveles de luz muy elevados) y zeaxantina depoxidasa (que cataliza la reacción en reversa, convirtiendo la zeaxantina a anteraxantina y, después, a violaxantina cuando los niveles de luz no son saturantes) puede estar parcialmente regulada por cambios en la temperatura y la disponibilidad de agua (Dobra et al., 2010; Du et al., 2009; North et al., 2005). Sin embargo, en el caso del maíz Cónico Norteño, debieran realizarse más estudios al respecto, los que debieran estar específicamente

dirigidos a determinar si plantas expuestas a condiciones de cambio climático presentan cambios en la expresión de los genes vinculados a una mayor tolerancia a la aridez.

Los resultados de este estudio indican que el maíz Cónico Norteño tiene una alta capacidad para tolerar las condiciones ambientales esperadas al corto plazo debido al avance del cambio climático. Esto coincide con lo propuesto por otros autores, quienes sugirieron que las razas de maíz nativas de México con ciclos de cultivo cortos, y especialmente aquellas desarrolladas en climas áridos y semiáridos, son altamente tolerantes a la sequía y a las altas temperaturas (Diédhiou et al., 2022; Ramírez, 2013; Ruiz-Corral et al., 2013). Sin embargo, es importante mencionar que este estudio solamente se enfocó en el desarrollo vegetativo del maíz Cónico Norteño, por lo que aún sería importante determinar si las respuestas positivas que presentaron las plantas al estar sometidas a condiciones de cambio climático también se traducen en un mayor rendimiento de la cosecha.

CONCLUSIONES

- Las cámaras de techo abierto empleadas en este estudio permitieron simular adecuadamente los cambios de temperatura esperados a mediados de este siglo en ecosistemas áridos del centro de México. Aunque los refugios de lluvia también fueron efectivos para simular estas condiciones, su diseño se debiera revisar y perfeccionar en futuros estudios para reducir con mayor exactitud la precipitación a los niveles predichos por los modelos de cambio climático.
- La raza de maíz Cónico Norteño, de ciclo de cultivo corto y adaptada a climas cálidos y secos de México, pudiera ser una opción adecuada para los pequeños

productores de este país que practican la agricultura de temporal, especialmente en un futuro donde las temperaturas se elevarán y la precipitación disminuirá.

- Aunque el maíz Cónico Norteño sobrevive y crece con más éxito bajo condiciones de mayor aridez, probablemente debido a la expresión de una serie de caracteres que no se manifiestan bajo el clima actual, es necesario seguir realizando investigaciones con esta y otras razas de maíz nativas de México. Esto permitirá tomar decisiones respecto a cuáles de ellas se pueden cultivar bajo las condiciones climáticas que se esperan en las diferentes regiones del país en escenarios de cambio climático.

BIBLIOGRAFÍA

- Adams, W. W., & Demmig-Adams, B. (2004). Chlorophyll fluorescence as a tool to monitor plant response to the environment. In G. C. Papageorgiou & Govindjee (Eds.), *Chlorophyll a fluorescence: a signature of photosynthesis* (pp. 583–604). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-3218-9_22
- Adams, W. W., Zarter, C. R., Mueh, K. E., Amiard, V., & Demmig-Adams, B. (2008). Energy dissipation and photoinhibition: a continuum of photoprotection. In B. Demmig-Adams, W. W. Adams, & A. K. Matto (Eds.), *Photoprotection, photoinhibition, gene regulation, and environment* (pp. 49–64). Springer. https://doi.org/10.1007/1-4020-3579-9_5
- Aragón-Gastélum, J. L., Badano, E. I., Yáñez-Espinosa, L., Ramírez-Tobías, H. M., Rodas-Ortiz, J. P., González-Salvatierra, C., & Flores, J. (2017). Seedling survival of three endemic and threatened Mexican cacti under induced climate

- change. *Plant Species Biology*, 32(1), 92–99. <https://doi.org/10.1111/1442-1984.12120>
- Arora, N. K. (2019). Impact of climate change on agriculture production and its sustainable solutions. *Environmental Sustainability*, 2(2), 95–96. <https://doi.org/10.1007/S42398-019-00078-W>
- Badano, E. I., Guerra-Coss, F. A., Sánchez-Montes de Oca, E. J., Briones-Herrera, C. I., & Gelviz-Gelvez, S. M. (2019). Climate change effects on early stages of *Quercus ariifolia* (Fagaceae), an endemic oak from seasonally dry forests of Mexico. *Acta Botanica Mexicana*, 126(126). <https://doi.org/10.21829/ABM126.2019.1466>
- Badano, E. I., & Sánchez-Montes de Oca, E. J. (2022). Seed fate, seedling establishment and the role of propagule size in forest regeneration under climate change conditions. *Forest Ecology and Management*, 503, 119776. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119776>
- Baker, N. R., & Oxborough, K. (2004). Chlorophyll fluorescence as a probe of photosynthetic productivity. In G. C. Papageorgiou & Govindjee (Eds.), *Chlorophyll a fluorescence: a signature of photosynthesis* (pp. 65–82). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-3218-9_3
- Bazzaz, F. A., & Cavendar-Bares, J. (2004). From leaves to ecosystem: using chlorophyll fluorescence to assess photosynthesis and plant function in ecological studies. In G. C. Papageorgiou & Govindjee (Eds.), *Chlorophyll a fluorescence: a signature of photosynthesis* (pp. 737–755). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-3218-9_29

- Bennett, A. J., Bending, G. D., Chandler, D., Hilton, S., & Mills, P. (2012). Meeting the demand for crop production: the challenge of yield decline in crops grown in short rotations. *Biological Reviews*, 87(1), 52–71. <https://doi.org/10.1111/J.1469-185X.2011.00184.X>
- Bocchiola, D., Nana, E., & Soncini, A. (2013). Impact of climate change scenarios on crop yield and water footprint of maize in the Po valley of Italy. *Agricultural Water Management*, 116, 50–61. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2012.10.009>
- Callen, E. O. (1965). Food habits of some pre-columbian Mexican indians. *Economic Botany*, 19(4), 335–343. <https://doi.org/10.1007/BF02904803>
- Castillo-Nonato, J. (2016). Conservación de la diversidad del maíz en dos comunidades de San Felipe del Progreso, Estado de México. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 13(2), 217–235. <https://revista-asyd.org/index.php/asyd/article/view/327>
- Cook, B. I., Mankin, J. S., Marvel, K., Williams, A. P., Smerdon, J. E., & Anchukaitis, K. J. (2020). Twenty-first century drought projections in the CMIP6 forcing scenarios. *Earth's Future*, 8(6), e2019EF001461. <https://doi.org/10.1029/2019EF001461>
- Cudjoe, G. P., Antwi-Agyei, P., & Gyampoh, B. A. (2021). The effect of climate variability on maize production in the Ejura-Sekyedumase municipality, Ghana. *Climate*, 9(10), 145. <https://doi.org/10.3390/CL19100145>
- DaMatta, F. M., Grandis, A., Arenque, B. C., & Buckeridge, M. S. (2010). Impacts of climate changes on crop physiology and food quality. *Food Research*

International, 43(7), 1814–1823.

<https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2009.11.001>

Damián-Huato, M. Á., Romero-Arenas, O., Ramírez-Valverde, B., López-Reyes, L., Parraguirre-Lezama, C., & Cruz-León, A. (2014). Agricultura familiar y seguridad alimentaria entre productores de maíz de temporal en México. *Agroecología*, 9, 89–99. <https://revistas.um.es/agroecologia/article/view/300611>

Diédhiou, I., Ramírez-Tobias, H. M., Fortanelli-Martinez, J., Flores-Ramírez, R., & Flores, J. (2022). Induced passive heating on the emergence, early growth and photochemical responses of seedlings of native maize (*Zea mays* L.) genotypes from warm-dry, temperate, and hot and humid climates. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 35(10), 815–826.

<https://doi.org/10.9755/EJFA.2022.V34.I10.2929>

Ding, L., Wang, K. J., Jiang, G. M., Li, Y. G., Jiang, C. D., Liu, M. Z., Niu, S. L., & Peng, Y. (2006). Diurnal variation of gas exchange, chlorophyll fluorescence, and xanthophyll cycle components of maize hybrids released in different years. *Photosynthetica*, 44(1), 26–31. <https://doi.org/10.1007/S11099-005-0154-3>

Dobra, J., Motyka, V., Dobrev, P., Malbeck, J., Prasil, I. T., Haisel, D., Gaudinova, A., Havlova, M., Gubis, J., & Vankova, R. (2010). Comparison of hormonal responses to heat, drought and combined stress in tobacco plants with elevated proline content. *Journal of Plant Physiology*, 167(16), 1360–1370.

<https://doi.org/10.1016/J.JPLPH.2010.05.013>

Du, Y. Y., Shin, S., Wang, K. R., Lu, J. L., & Liang, Y. R. (2009). Effect of temperature on the expression of genes related to the accumulation of chlorophylls and

- carotenoids in albino tea. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 84(3), 365–369. <https://doi.org/10.1080/14620316.2009.11512533>
- Eagles, H. A., & Lothrop, J. E. (1994). Highland maize from central Mexico - Its origin, characteristics, and use in breeding programs. *Crop Science*, 34(1), 11–19. <https://doi.org/10.2135/CROPSCI1994.0011183X003400010002X>
- Ellis, R. H. (1992). Seed and seedling vigour in relation to crop growth and yield. *Plant Growth Regulation*, 11(3), 249–255. <https://doi.org/10.1007/BF00024563>
- Fracheboud, Y., & Leipner, J. (2003). The application of chlorophyll fluorescence to study light, temperature, and drought stress. In J. R. DeEll & P. M. A. Toivonen (Eds.), *Practical Applications of Chlorophyll Fluorescence in Plant Biology* (pp. 125–150). Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-0415-3_4
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana* (5th ed.). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Govindjee. (2004). Chlorophyll a fluorescence: a bit of basics and history. In G. C. Papageorgiou & Govindjee (Eds.), *Chlorophyll a fluorescence: a signature of photosynthesis* (pp. 1–41). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-3218-9_1
- Guerra-Coss, F. A., Badano, E. I., Cedillo-Rodríguez, I. E., Ramírez-Albores, J. E., Flores, J., Barragán-Torres, F., & Flores-Cano, J. A. (2021). Modelling and validation of the spatial distribution of suitable habitats for the recruitment of invasive plants on climate change scenarios: an approach from the regeneration niche. *Science of the Total Environment*, 777, 146007. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146007>

- Huang, L. F., Zheng, J. H., Zhang, Y. Y., Hu, W. H., Mao, W. H., Zhou, Y. H., & Yu, J. Q. (2006). Diurnal variations in gas exchange, chlorophyll fluorescence quenching and light allocation in soybean leaves: the cause for midday depression in CO₂ assimilation. *Scientia Horticulturae*, 110(2), 214–218. <https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2006.07.001>
- Jackson, R. B., Pockman, W. T., & Hoffmann, W. A. (1999). The structure and function of root systems. In F. I. Pugnaire & F. Valladares (Eds.), *Handbook of functional plant ecology* (pp. 195–219). Marcel Dekker.
- Jarvis, A., Lane, A., & Hijmans, R. J. (2008). The effect of climate change on crop wild relatives. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 126(1–2), 13–23. <https://doi.org/10.1016/J.AGEE.2008.01.013>
- Kaplan, E. L., & Meier, P. (1958). Nonparametric estimation from incomplete observations. *Journal of the American Statistical Association*, 53(282), 457–481. <https://doi.org/10.2307/2281868>
- Kato-Yamakake, T. Á., Mapes-Sánchez, C., Mera-Ovando, L. M., Serratos-Hernández, J. A., & Bye-Boettler, R. A. (2009). El origen y diversificación del maíz en México. Universidad Nacional Autonoma de Mexico.
- Khamis, S., Lamaze, T., Lemoine, Y., & Foyer, C. (1990). Adaptation of the photosynthetic apparatus in maize leaves as a result of nitrogen limitation: relationships between electron transport and carbon assimilation. *Plant Physiology*, 94(3), 1436–1443. <https://doi.org/10.1104/PP.94.3.1436>
- Kimm, H., Guan, K., Gentine, P., Wu, J., Bernacchi, C. J., Sulman, B. N., Griffis, T. J., & Lin, C. (2020). Redefining droughts for the U.S. Corn Belt: the dominant role of atmospheric vapor pressure deficit over soil moisture in regulating

- stomatal behavior of Maize and Soybean. *Agricultural and Forest Meteorology*, 287, 107930. <https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2020.107930>
- Kleinbaum, D. G., & Klein, M. (2005). *Survival analysis* (3rd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6646-9>
- Knutti, R., Rugenstein, M. A. A., & Hegerl, G. C. (2017). Beyond equilibrium climate sensitivity. *Nature Geoscience*, 10(10), 727–736. <https://doi.org/10.1038/ngeo3017>
- Li, Z., Yang, P., Tang, H., Wu, W., Yin, H., Liu, Z., & Zhang, L. (2014). Response of maize phenology to climate warming in Northeast China between 1990 and 2012. *Regional Environmental Change*, 14(1), 39–48. <https://doi.org/10.1007/S10113-013-0503-X/FIGURES/4>
- Marion, G. M., Henry, G. H. R., Freckman, D. W., Johnstone, J., Jones, C. G., Jones, M. H., Lévesque, E., Molau, U., Molgaard, P., Parsons, A. N., Svoboda, J., & Virginia, R. A. (1997). Open-top designs for manipulating field temperature in high-Latitude ecosystems. *Global Change Biology*, 3(S1), 20–32. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.1997.gcb136.x>
- Martínez-Ferri, E., Balaguer, L., Valladares, F., Chico, J. M., & Manrique, E. (2000). Energy dissipation in drought-avoiding and drought-tolerant tree species at midday during the Mediterranean summer. *Tree Physiology*, 20(2), 131–138. <https://doi.org/10.1093/TREEPHYS/20.2.131>
- Matsuoka, Y., Vigouroux, Y., Goodman, M. M., Sanchez, J. G., Buckler, E., & Doebley, J. (2002). A single domestication for maize shown by multilocus microsatellite genotyping. *Proceedings of the National Academy of Sciences of*

the United States of America, 99(9), 6080–6084.

<https://doi.org/10.1073/PNAS.052125199>

Maxwell, K., & Johnson, G. (2000). Chlorophyll fluorescence - A practical guide.

Journal of Experimental Botany, 51(345), 659–668.

<https://doi.org/10.1093/jexbot/51.345.659>

Meehl, G. A., Senior, C. A., Eyring, V., Flato, G., Lamarque, J. F., Stouffer, R. J.,

Taylor, K. E., & Schlund, M. (2020). Context for interpreting equilibrium climate sensitivity and transient climate response from the CMIP6 Earth system models.

Science Advances, 6(26), eaba1981. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aba1981>

Meinshausen, M., Nicholls, Z. R. J., Lewis, J., Gidden, M. J., Vogel, E., Freund, M.,

Beyerle, U., Gessner, C., Nauels, A., Bauer, N., Canadell, J. G., Daniel, J. S.,

John, A., Krummel, P. B., Luderer, G., Meinshausen, N., Montzka, S. A., Rayner,

P. J., Reimann, S., ... Wang, R. H. J. (2020). The shared socio-economic pathway

(SSP) greenhouse gas concentrations and their extensions to 2500. Geoscientific

Model Development, 13(8), 3571–3605. [https://doi.org/10.5194/GMD-13-3571-](https://doi.org/10.5194/GMD-13-3571-2020)

[2020](https://doi.org/10.5194/GMD-13-3571-2020)

Mendelsohn, R. (2008). The impact of climate change on agriculture in developing

countries. Journal of Natural Resources Policy Research, 1(1), 5–19.

<https://doi.org/10.1080/19390450802495882>

Min, C.-W., Khan, I., Kim, M.-J., Yoon, I.-K., Jung, J. S., & Lee, B.-H. (2021). An

open top chamber for forage maize to study the effect of elevated temperature by

global warming. Journal of The Korean Society of Grassland and Forage Science,

41(3), 183–188. <https://doi.org/10.5333/KGFS.2021.41.3.183>

- Murray-Tortarolo, G. N. (2021). Seven decades of climate change across Mexico. *Atmósfera*, 34(2), 217–226. <https://doi.org/10.20937/ATM.52803>
- Murray-Tortarolo, G. N., Jaramillo, V. J., & Larsen, J. (2018). Food security and climate change: the case of rainfed maize production in Mexico. *Agricultural and Forest Meteorology*, 253, 124–131. <https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2018.02.011>
- North, H. M., Frey, A., Boutin, J. P., Sotta, B., & Marion-Poll, A. (2005). Analysis of xanthophyll cycle gene expression during the adaptation of *Arabidopsis* to excess light and drought stress: changes in RNA steady-state levels do not contribute to short-term responses. *Plant Science*, 169, 115–124. <https://doi.org/10.1016/J.PLANTSCI.2005.03.002>
- Olesen, J. E., Trnka, M., Kersebaum, K. C., Skjelvåg, A. O., Seguin, B., Peltonen-Sainio, P., Rossi, F., Kozyra, J., & Micale, F. (2011). Impacts and adaptation of European crop production systems to climate change. *European Journal of Agronomy*, 34(2), 96–112. <https://doi.org/10.1016/J.EJA.2010.11.003>
- Ortega-Gaucin, D., Bartolón, J. de la C., & Bahena, H. V. C. (2018). Drought vulnerability indices in Mexico. *Water*, 10(11), 1671. <https://doi.org/10.3390/W10111671>
- Parlange, M. B., Cahill, A. T., Nielsen, D. R., Hopmans, J. W., & Wendroth, O. (1998). Review of heat and water movement in field soils. *Soil and Tillage Research*, 47(1), 5–10. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(98\)00066-X](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(98)00066-X)
- Pérez-Ruiz, C. L., Badano, E. I., Rodas-Ortiz, J. P., Delgado-Sánchez, P., Flores, J., Douterlungne, D., & Flores-Cano, J. A. (2018). Climate change in forest ecosystems: a field experiment addressing the effects of raising temperature and

reduced rainfall on early life cycle stages of oaks. *Acta Oecologica*, 92, 35–43.

<https://doi.org/10.1016/j.actao.2018.08.006>

Ramírez, C. A. (2013). Selección de maíces criollos de ciclo corto como estrategia frente al cambio climático en Michoacán. *Avances en Investigación Agropecuaria*, 17(2), 7–21.

Rashid, K., & Rasul, G. (2011). Rainfall variability and maize production over the Potohar Plateau of Pakistan. *Pakistan Journal of Meteorology*, 8(15), 63–74.

Reyes-Santiago, E., Bautista-Mayorga, F., & García-Salazar, J. A. (2022). Análisis del mercado de maíz en México desde una perspectiva de precios. *Acta Universitaria*, 32, e3265. <https://doi.org/10.15174/AU.2022.3265>

Riley, G. J. P. (1981). Effects of high temperature on the germination of maize (*Zea mays* L.). *Planta*, 151(1), 68–74. <https://doi.org/10.1007/BF00384239/METRICS>

Rocha-Escalante, H., Jaimes-Arredondo, A., Cardona-Benavides, A., Rodríguez-Cuevas, C., Giácoman-Vallejos, G., Aceves-De Alba, J., García-Arreola, M. E., & Cisneros-Almazán, R. (2022). Tendencias de precipitación y temperatura en el altiplano potosino, México (1975-2015). *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 13(4), 75–126. <https://doi.org/10.24850/J-TYCA-2022-04-02>

Ruiz-Corral, J. A., Hernández-Casillas, J. M., Sánchez-González, J. de J., Ortega-Corona, A., Ramírez-Ojeda, G., Guerrero-Herrera, M. J., Aragón-Cuevas, F., Vidal-Martínez, V. A., & de la Cruz-Larios, L. (2013). Ecología, adaptación y distribución actual y potencial de las razas mexicanas de maíz. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.

- Salinger, M. J., Verdi, L., Dalla Marta, A., Dalu, G., Baldi, M., Messeri, G., Vallorani, R., Morabito, M., Crisci, A., Altobelli, F., Orlandini, S., Gozzini, B., & Messeri, A. (2022). Linking maize yields in Veneto Italy, to large-scale atmospheric variability, circulation regimes and weather types. *Journal of Agricultural Science*, 160(6), 423–439. <https://doi.org/10.1017/S0021859622000545>
- Sánchez, B., Rasmussen, A., & Porter, J. R. (2014). Temperatures and the growth and development of maize and rice: a review. *Global Change Biology*, 20(2), 408–417. <https://doi.org/10.1111/GCB.12389>
- Sanchez, J. J., Goodman, M. M., & Stuber, C. W. (2000). Isozymatic and morphological diversity in the races of maize of Mexico. *Economic Botany*, 54(1), 43–59. <https://doi.org/10.1007/BF02866599>
- Sandoval-Martínez, J., Flores-Cano, J. A., & Badano, E. I. (2022). Recruitment of pioneer trees with physically dormant seeds under climate change: the case of *Vachellia pennatula* (Fabaceae) in semiarid environments of Mexico. *Journal of Plant Research*, 135(3), 453–463. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10265-022-01383-y>
- Tracy, W. F. (1999). Vegetable uses of maize (corn) in pre-columbian America. *HortScience*, 34(5), 812–813. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.34.5.812>
- Wang, J., Vanga, S. K., Saxena, R., Orsat, V., & Raghavan, V. (2018). Effect of climate change on the yield of cereal crops: a review. *Climate*, 6(2), 41. <https://doi.org/10.3390/CLI6020041>
- Waqas, M. A., Wang, X., Zafar, S. A., Noor, M. A., Hussain, H. A., Azher Nawaz, M., & Farooq, M. (2021). Thermal stresses in maize: effects and management strategies. *Plants*, 10(2), 293. <https://doi.org/10.3390/PLANTS10020293>

- Wellhausen, E. J., Roberts, L. M., Hernandez, X., & Mangelsdorf, P. C. (1951). Razas de maíz en México, su origen, características y distribución. Secretaría de Agricultura y Ganadería de México and Rockefeller Foundation.
- Xue, X., Du, S., Jiao, F., Xi, M., Wang, A., Xu, H., Jiao, Q., Zhang, X., Jiang, H., Chen, J., & Wang, M. (2021). The regulatory network behind maize seed germination: effects of temperature, water, phytohormones, and nutrients. *The Crop Journal*, 9(4), 718–724. <https://doi.org/10.1016/J.CJ.2020.11.005>
- Yahdjian, L., & Sala, O. E. (2002). A rainout shelter design for intercepting different amounts of rainfall. *Oecologia*, 133(2), 95–101. <https://doi.org/10.1007/s00442-002-1024-3>
- Zar, J. H. (2010). *Biostatistical analysis* (5th ed.). Prentice Hall.