

9. Sustentabilidad alimentaria rural frente al cambio climático: estrategias agroecológicas para el manejo del maíz



MARÍA GUADALUPE CARRILLO GALVÁN*
MANUEL JESÚS CACH PÉREZ**

DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.319.09>

Resumen

El cambio climático global representa una seria amenaza para la sustentabilidad alimentaria, particularmente en el ámbito rural, donde los productores carecen de medios económicos para generar alternativas que ayuden a reducir sus efectos negativos sobre los cultivos. El manejo del microclima a través de prácticas agrícolas podría ser una alternativa en el cultivo del maíz, por ejemplo, ya que no requiere de inversión adicional a lo que los productores han realizado por miles de años (como la milpa) pero que en años recientes han reducido su uso, o de alternativas cuyas ventajas no han tenido mucha difusión, como el cultivo de maíz en sistemas agroforestales. En el presente trabajo se compara la variación microclimática y desempeño fisiológico de maíz nativo en cuatro sitios edáfica y climáticamente contrastantes del sur-sureste de México bajo sistemas de monocultivo, milpa y sistemas agroforestales con aplicación de cobertura al suelo. La milpa demostró una amplia ventaja en la retención de agua en suelo y reducción de temperatura del mismo en comparación con el monocultivo, lo mismo que

* Doctora en Ciencias. Investigadora por México-SECIHTI en el Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo-Colima, México. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3492-5777>

** Doctor en Ciencias Biológicas. Investigador titular en El Colegio de la Frontera Sur, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4972-0458>. Correo electrónico: mcach@ecosur.mx

la aplicación de cobertura en los sistemas agroforestales. Lo anterior se reflejó en un mejor desempeño fisiológico del maíz, lo que podría traducirse en una mayor productividad. Se realza la importancia del uso de maíces nativos, así como la práctica de la milpa como herramientas que contribuyen a la conservación de recursos como el agua y tienen un aporte significativo a la dieta de los productores.

Palabras clave: *milpa, maíz nativo, sistema agroforestal, microclima.*

Agricultura y domesticación de plantas

Mesoamérica, junto con el Cercano Oriente y Norte de China, es uno de los centros más antiguos de origen de la agricultura y domesticación de plantas (Harlan, 1971). Como región geográfica abarca la mitad meridional de México, Guatemala, Belice, Honduras, El Salvador, Nicaragua y la porción noroccidental de Costa Rica, sin embargo, Matos-Moctezuma (1994) menciona que ha sido una región dinámica en el tiempo, por lo que sus fronteras variaron a lo largo de la historia. Es una de las regiones con alta diversidad biocultural, cuyo rasgo distintivo es el agroecosistema llamado “milpa” y un complejo sistema alimentario basado en él. En esta región aún se investiga dónde se originó la agricultura y la domesticación de los elementos principales que conforman la milpa: maíz (*Zea mays* L.), frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) y calabaza (*Cucurbita argyrosperma* K. Koch).

La domesticación de plantas se define como un proceso evolutivo en el que la fuerza evolutiva más importante es la selección humana, acorde a su uso y manejo, que como resultado genera la fijación de un grupo de alelos (en las poblaciones involucradas) que les confieren fenotipos favorables tanto al consumo humano como al cultivo (Gepts, 2004). En este sentido, los elementos fundamentales del agroecosistema milpa tienen un alto grado de domesticación, es decir, que su fenotipo es totalmente diferente al de sus respectivas poblaciones silvestres. Al conjunto de diferencias morfológicas, fisiológicas y genéticas entre las poblaciones silvestres y domesticadas se le conoce como síndrome de domesticación (Hammer, 1984; Gepts, 2004; Zizumbo y Colunga, 2008).

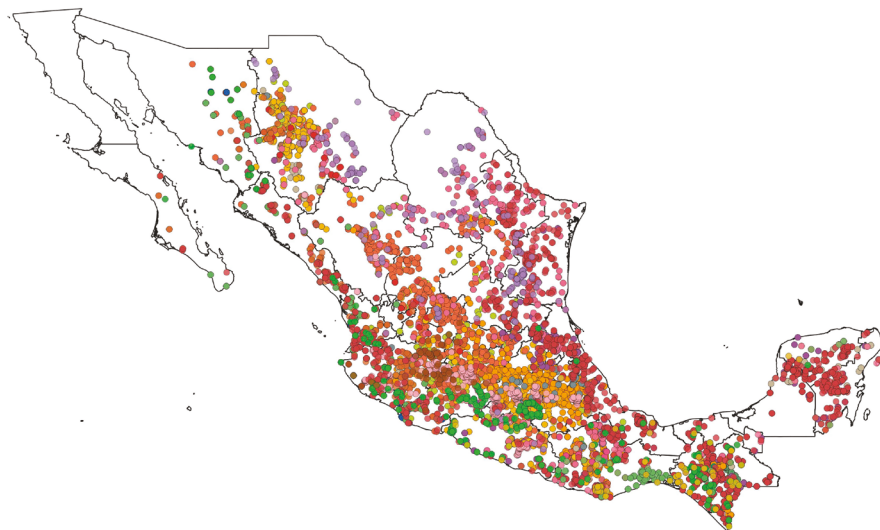
Aunque algunas plantas estén completamente domesticadas, es decir, que cuenten con una menor adecuación y nula dispersión en condiciones naturales y, por lo tanto, su persistencia dependa del manejo y la selección humana (como es el caso del maíz, entre otras plantas), el proceso evolutivo bajo domesticación aún continúa, ya que su diversificación depende de las preferencias culturales en cada región geográfica, las cuales son distintas y dinámicas en el tiempo (Harlan, 1975; Colunga-GarcíaMarín y Zizumbo-Villarreal, 1993; Zohary y Hopf, 1993; Da Fonseca et al., 2015).

El proceso de domesticación, el ejemplo del maíz en México

El maíz se originó a través del manejo y selección del Teocintle; si bien existen teorías sobre una domesticación estratificada del maíz, Mesoamérica y, en particular México, es considerado como su centro de origen (Kato et al., 2009; Kistler et al., 2018, 2020; Costa et al., 2024). A lo que comúnmente se le llama Teocintle es un conjunto variable de pastos pertenecientes al menos a ocho especies diferentes dentro del género *Zea*, cuya distribución va desde Chihuahua, en México, hasta Costa Rica, aunque la mayor diversidad se encuentra en México, donde la mayor distribución se encuentra en el centro y occidente del país, así como algunas regiones del sur del país (Sánchez y Ruiz, 1996; Wilkes, 2004; Conabio, 2011; Rivera-Rodríguez et al., 2019).

A través de su domesticación, cuyo inicio fue por lo menos hace 9 000 años, hoy en día en México se encuentran 64 razas de maíz, de las cuales 59 son consideradas como nativas (Conabio, 2020; Rosado y Serrano, 2021), que se distribuyen y utilizan a lo largo del país, desde los cero hasta los 3 400 metros sobre el nivel del mar y, por tanto, bajo un gran contraste de condiciones socioculturales y ambientales (altitud, temperatura, precipitación, humedad), edáficas (profundidad del suelo, presencia de pedregosidad, inclinación, etc.; Conabio, 2015, 2020; figura 9.1).

Figura 9.1. *Distribución puntual de las 64 razas de maíces en México*



Fuente: elaborado a partir de datos obtenidos del Proyecto Global de Maíces Nativos (Conabio, 2015).

En este sentido, es importante señalar que cada raza y variedad de maíz se encuentra adaptada a las condiciones locales en las que se cultiva, por lo que pueden presentar una alta resistencia a plagas y enfermedades, tolerancia a la sequía, al frío o al calor, a suelos pobres en nutrientes, y pueden presentar un mejor sabor, y bajo condiciones de almacenamiento suelen durar más tiempo que las variedades mejoradas (Brush, 1991). Por ejemplo, los maíces que se cultivan en el estado de Yucatán están adaptados, en su mayoría, a una precipitación relativamente baja (hasta 1600 mm totales anuales) y suelos poco profundos con presencia de alta pedregosidad, mientras que los de Tabasco están adaptados a suelos más profundos y pueden ser tolerantes a inundaciones, u otros como el olotón que están adaptados a crecer en el bosque mesófilo de montaña (Mares-Guerrero et al., 2024; Mera y Mapes, 2009; Peraza-Villarreal et al., 2019; Pérez-Hernández et al., 2021).

Sin embargo, dado su alta importancia sociocultural en México, el manejo humano actual promueve una gran movilidad del maíz de una región geográfica a otra, lo que puede promover el proceso de diversificación que favorece la variación genética, y que viene ocurriendo desde el inicio de su manejo y domesticación (Kato et al., 2009).

El cultivo del maíz en México y Mesoamérica: la milpa

Actualmente, el maíz representa la base de la alimentación mexicana; anualmente, el consumo per cápita es de 196.4 kilogramos al año (tan solo de maíz blanco), principalmente en forma de tortillas, pero también a través de diversos platillos que se guisan en todo el país (Sagarpa, 2017). Acorde a lo anterior, el maíz blanco es el cultivo anual que tiene la mayor producción a cielo abierto en México (21.992 millones de ton en 6.07 millones de ha sembradas) cuyo destino es la alimentación humana, mientras que el maíz amarillo (utilizado para la alimentación animal) ocupa el tercer puesto con 3.47 millones de ton en 710 273 ha (INEGI, 2022).

El maíz en México es cultivado bajo una gran diversidad de sistemas de manejo que varían ampliamente de una región a otra, influenciados principalmente por las características climáticas, topográficas y bioculturales de una región geográfica en particular (Aguilar et al., 2003; Mariaca, 2011; González-Merino y Ávila-Castañeda, 2014; Mateos-Maces et al., 2016). Sin embargo, la agricultura tradicional empleada por los grupos étnicos es uno de los mecanismos más utilizados en el cultivo del maíz, lo que contribuye a resguardar la riqueza del germoplasma presente en el país (Mera y Mapes, 2009).

La agricultura tradicional se refiere a las diversas actividades y procesos que se han practicado, mejorado y adaptado durante generaciones en las comunidades, y que han desembocado en los actuales sistemas de producción en ellas (Tuxill y Nabhan, 2001). Este tipo de prácticas productivas depende de la lluvia como fuente de agua para los cultivos (Kato et al., 2009). En este sentido, una de las prácticas más empleadas por los pequeños productores de maíz en México es el sistema milpa (Aguilar et al., 2003).

La milpa es un agroecosistema mesoamericano, cuya práctica inicio probablemente 9 000 años atrás. Es un sistema cultural y tecnológico altamente dinámico que se basa en un policultivo donde se establece el maíz en conjunto con otras especies, generalmente frijol (hasta cinco especies diferentes) y calabaza (hasta cuatro especies diferentes), aunque dependiendo de la región geográfica se pueden encontrar distintas leguminosas, tubérculos, flores y otras especies vegetales, cuyos principales usos son como alimenticias y medicinales (Aguilar et al., 2003; Zizumbo-Villarreal y Colunga-GarcíaMarín, 2017; CIMMYT, 2020).

La milpa pudo haberse originado en el occidente de México donde los parientes silvestres del maíz, frijol y calabaza están en contacto de manera natural, y donde los humanos pudieron haber empezado a manejarlos (Zizumbo-Villarreal et al., 2012), extendiendo esta práctica al resto de Mesoamérica. Este sistema de manejo es de gran relevancia histórico-cultural en el desarrollo de los pueblos mesoamericanos, ya que fue motor de la dieta de los habitantes de esta región. Zizumbo-Villarreal et al. (2016) mencionan que el sistema alimentario precolombino pudo estar conformado por alrededor de 100 platillos elaborados a partir de 75 especies de plantas silvestres, 19 domesticadas o cultivadas nativas, 12 domesticadas que pudieron haber sido introducidas de otras regiones y seis hongos, además 19 especies de animales silvestres y cuatro domesticados, a lo cual denominaron la dieta mesoamericana y siguen estando presentes como principal alimento de campesinos rurales (Zizumbo-Villarreal et al., 2012).

Dada la composición de la milpa (principalmente compuesta por maíz, frijol y calabaza), se propicia un adecuado uso de recursos como el agua, luz solar y nutrientes debido a la estructura de estratos múltiples que se conforman. En un primer estrato se encuentra la planta de maíz que funge como sostén para el frijol; en el estrato medio, el frijol produce más nódulos de raíces por planta en comparación a un cultivo en solitario, lo que podría incrementar la fijación de nitrógeno que, a su vez, puede ser aprovechado por el maíz y la calabaza. Finalmente, en un tercer estrato se encuentra la calabaza cuyas hojas anchas y gruesas, aunado a su crecimiento horizontal, forman una capa que cubre el suelo, lo que puede reducir el establecimiento de malezas e incrementar la retención de agua en el suelo (Gliessman, 1983; Altieri, 2018; Pérez-Hernández et al., 2021; Mares-Guerrero et al., 2024).

Si bien existe una gran diversidad de formas de integrar la milpa, en la mayoría de los casos se utilizan maíces nativos, en donde en más del 70 % de los casos se usan semillas del mismo agricultor (Mera y Mapes, 2009), algo similar a lo que ocurre con el frijol y la calabaza. Es justo este manejo el que resguarda, promueve y enriquece la gran agrobiodiversidad asociada a la milpa (Mariaca, 2011).

Si bien la milpa es una estrategia milenaria para el cultivo del maíz y otros productos alimenticios (principalmente nativos) con alto valor bio-

cultural, y que además puede ofrecer grandes ventajas socio-ambientales, su práctica se ha visto amenazada debido a diversos factores como un decremento en su rendimiento (que conlleva pérdida de semillas nativas), la dependencia de maíz externo a este sistema de cultivo, el incremento en los costos de producción, la variabilidad climática, falta de incentivos económicos para incrementar la producción y cadenas de comercialización, la carencia de organización, infraestructura, el bajo precio de los maíces nativos, y la cada vez menor mano de obra necesaria para el trabajo, entre otros (López-Torres et al., 2016; INEGI, 2022). Lo anterior podría derivar en un riesgo para cubrir las necesidades alimentarias de quienes la practican y, por tanto, en la sustentabilidad alimentaria en un amplio sector de la población, particularmente en el ámbito rural.

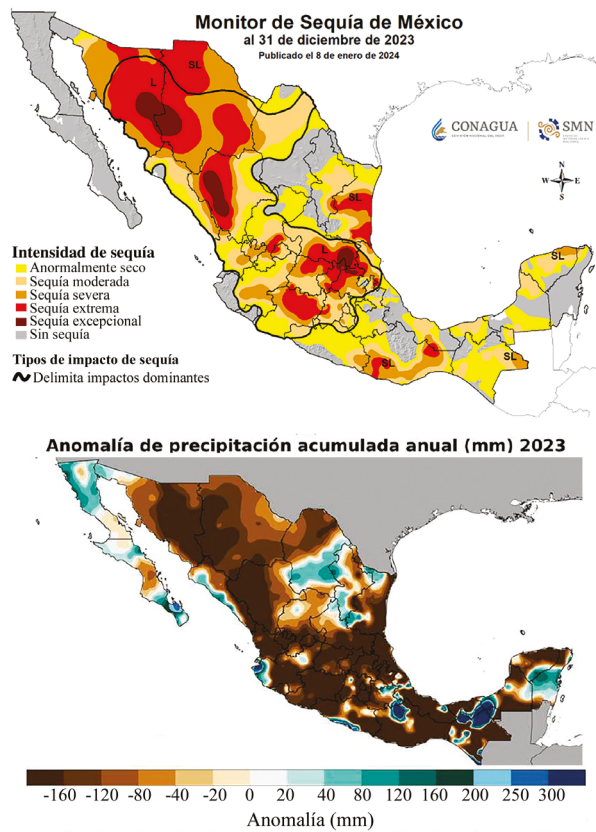
Efecto del cambio climático sobre plantas cultivadas y sus amenazas a la sustentabilidad alimentaria

Se proyecta que el cambio climático afecte negativamente la seguridad alimentaria al impactar de manera negativa sus cuatro pilares (disponibilidad, acceso, utilización y estabilidad), lo anterior derivado del incremento de la temperatura a nivel global, cambios en los patrones de precipitación y un incremento en la frecuencia de eventos extremos como sequías y huracanes, por mencionar algunos ejemplos (Mbow et al., 2019). En este contexto, los productores y consumidores de menores ingresos serán los más afectados por carecer de los recursos para invertir en estrategias de adaptación y diversificación (Bailey et al., 2015; FAO, 2018; Mbow et al., 2019).

El calentamiento global observado entre 1900 y 2015 (hasta 1.68 °C) ha provocado mayor frecuencia, intensidad y duración de diversos fenómenos como olas de calor, sequías en algunas regiones de mundo, mientras en otras ha incrementado las precipitaciones fuertes. Aunado al incremento de la temperatura, la variabilidad que genera en los patrones de precipitación ha provocado una reducción en el rendimiento de cultivos como maíz y trigo en latitudes bajas del planeta (Mall et al., 2017; Siebert et al., 2017; Masson-Delmotte et al., 2022).

En México, por ejemplo, durante el año 2023, la mayor parte del territorio nacional registró condiciones de sequía que fueron de moderada a excepcional (figura 9.2), derivado de una fuerte anomalía en la precipitación, es decir, se registraron variaciones en el inicio y duración de la temporada de lluvias, lo que derivó en que en la mayor parte del país se registrara menos precipitación acumulada, respecto a los registros de los últimos 30 años (figura 9.2; Servicio Meteorológico Nacional, 2024). Estas anomalías climáticas conllevan una fuerte alteración en la producción de alimentos: tan solo en el año 2022, 1 821 456 ha no pudieron ser sembradas, entre otras cosas, por un clima adverso para la agricultura (INEGI, 2022).

Figura 9.2. Monitor de sequía en al 31 de diciembre de 2023 y anomalía de precipitación acumulada anual (mm) para el año 2023 en México



Fuente: modificado de Servicio Meteorológico Nacional (2024).

Si se considera que el 35 % de los alimentos a nivel global y hasta el 70 % en países de ingreso medio y bajo provienen de pequeños productores carentes de recursos técnicos y económicos para hacer frentes a estas variaciones, se podrá dimensionar la amenaza a la seguridad alimentaria global. En el caso de México, el 54 % de la producción de alimentos depende de los pequeños productores y, para el 2022, el 74 % de superficie agrícola del país era de temporal (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2020; IFAD, 2021; INEGI, 2022), lo que representa un alto riesgo para la producción de alimentos derivado de la alta variabilidad climática registrada los últimos años.

Como cualquier otro grupo de plantas, las especies cultivadas establecen interacciones bióticas y abióticas dentro del área de cultivo, cuyo resultado son diversas respuestas a nivel fisiológico, morfológico, bioquímico e incluso molecular. Por tanto, cualquier variación en alguno de los elementos bióticos o abióticos que rodean a las plantas, provocará en ellas diversas respuestas como una forma de aclimatare a las nuevas condiciones, siempre dentro del umbral de tolerancia de dichas plantas (Qaderi y Reid, 2009; Cach-Pérez et al., 2021). Por lo tanto, cambios continuos en las condiciones bióticas y abióticas dentro de las áreas de cultivo son de esperarse, ya que dependen no solo de las condiciones ambientales y su variabilidad, sino también del tipo de cultivo y de las estrategias de manejo utilizadas por los productores, lo que en conjunto determina la dinámica ecológica que se establece dentro de dichas áreas (Hoy, 2015).

De manera general, la reducción en el rendimiento de los cultivos a consecuencia de fenómenos derivados de la variación climática (patrones de precipitación, incremento de temperatura, sequía, inundaciones, entre otros) e incremento en la concentración de CO_2 es consecuencia del estrés fisiológico que las plantas presentan ante estos fenómenos (Singh, 2009; Jarma-Orozco et al., 2012; Mall et al., 2017).

Si bien la respuesta de las plantas depende del tipo de cultivo y región geográfica (IPCC, 2007), en general se ha observado que la temperatura influye sobre la germinación de semillas, crecimiento vegetativo, floración y fructificación. Temperaturas elevadas reducen la fotosíntesis, incrementan la transpiración y respiración de las plantas, desestabilizan la regulación hormonal y los metabolitos secundarios, favorecen las quemaduras solares en distintas estructuras de las plantas, provoca senescencia prematura de las hojas y reduce

el crecimiento de brotes y raíces (Almeida y Valle, 2007; Sage y Kubien, 2007; Ledesma et al., 2008; Restrepo-Díaz et al., 2010; Jarma-Orozco et al., 2012). Cada cultivo tiene una temperatura óptima para su desempeño, en el tomate (*Solanum lycopersicum* L.) por ejemplo, esta temperatura es alrededor de 30°C, una temperatura encima de los 34°C provoca una reducción en la formación de flores y, por tanto, de frutos, además de que temperaturas altas también afectan la germinación del polen, viabilidad de los óvulos, así como la posición de estigma y del estilo floral (Foolad, 2005; Wahid et al., 2007; Restrepo-Díaz et al., 2010). En otras plantas como el apio, lechuga y espinacas puede haber una reducción en la germinación de semillas si la temperatura sobrepasa los 35°C (Nascimento et al., 2000; Restrepo-Díaz et al., 2010).

El agua es fundamental para cualquier organismo vivo, en el caso de las plantas el estrés hídrico se produce cuando no hay agua suficiente en el suelo para sostener el crecimiento vegetal o para reponer el agua utilizada por las plantas en diferentes procesos (Larcher, 2003). El estrés hídrico puede provocar un descenso en el contenido relativo de agua en las hojas, lo que conlleva un cierre de los estomas a fin de evitar la pérdida de agua por transpiración pero, a la vez, reduce la cantidad de CO₂ que se asimila a través de la fotosíntesis reduciendo la cantidad de azúcares que se forman y, por tanto, la productividad de los cultivos (Marsal y Girona, 1997; Lombardini, 2006). Un efecto combinado de estrés hídrico y altas temperaturas puede producir un incremento en el déficit de presión de vapor de agua atmosférico (incrementando la demanda evaporativa), así como una reducción en la disponibilidad de agua en el suelo, lo que puede producir daños en el aparato fotosintético de las plantas y reducir su tasa fotosintética (Oliver et al., 2010; Sunkar, 2010).

En este sentido, el Maíz es una planta con una ruta fotosintética C4, por lo que es muy demandante de agua, además de que sus necesidades de disponibilidad de este recurso varían a lo largo de su desarrollo: el periodo de floración puede considerarse el más importante porque de la disponibilidad de agua en este periodo depende el desarrollo, la polinización y el llenado de los granos y, por ende, la productividad del cultivo (Reyes, 1990). A pesar de lo anterior, las plantas C4 tienen una mayor eficiencia fotosintética que las plantas C3, por lo que crecen más rápido y funcionan eficazmente a intensidades lumínicas más altas; además son entre 50 % y 300 % más eficientes

en el uso del agua y poseen mayor eficiencia en el uso del nitrógeno, lo que les permite una buena adaptación a zonas tropicales en donde la evapotranspiración y temperatura pueden ser altas (Brown, 1978; Sage y Pearcy, 1987; Sage y Stata, 2015; Wasilewska-Dębowska et al., 2022).

Alternativas frente al cambio climático en el ámbito rural

Una alternativa que puede contribuir a reducir los posibles efectos del cambio climático en la agricultura rural es el manejo del microclima (Cach-Pérez et al., 2021). El microclima puede ser definido como las condiciones climáticas particulares medidas alrededor de un organismo e incluye factores como la temperatura y humedad del aire, luz, formación de rocío, precipitación, temperatura y disponibilidad de agua en el suelo (M. Jones, 1985; Mislán y Helmuth, 2008). En el caso de las plantas, el microclima se refiere al espacio ubicado a centímetros o metros alrededor de ella, y que juega un papel fundamental en su crecimiento, reproducción, productividad, e incluso en su mortalidad (Naiman et al., 2005).

El manejo agrícola puede determinar las condiciones microclimáticas en el que las plantas cultivadas se establecen; por ejemplo, un sistema agroforestal de cacao con un dosel muy denso puede incrementar la humedad relativa del aire, reducir la temperatura del mismo, así como la velocidad del viento en comparación con un dosel más abierto, o en el caso específico del maíz, un monocultivo puede generar un microclima con temperaturas del aire y del suelo más altas y menor contenido de agua en suelo que una milpa (Jiménez-Pérez et al., 2019; Cach-Pérez et al., 2021; Pérez-Hernández et al., 2021; Mares-Guerrero et al., 2024).

Como se ha comentado anteriormente, si bien la milpa es una práctica milenaria en Mesoamérica, diversas presiones han originado que su práctica se reduzca, aun cuando puede ser una excelente alternativa para economizar recursos como el agua, particularmente en regiones tropicales en donde el cambio climático provocará alta variabilidad en la disponibilidad de este recurso a través de la lluvia, lo que puede ser de gran relevancia en la agricultura rural.

En este sentido, el uso de sistemas agroforestales para el cultivo de maíz ha sido poco explorado, particularmente porque la mayoría de razas de maíz requieren de grandes cantidades de luz solar para su crecimiento (establecimiento totalmente expuestas a la luz solar), por lo que en muchas ocasiones se ha considerado que el establecimiento de árboles dentro de la zona de cultivo puede competir por este recurso, e impedir el correcto desarrollo del maíz. Sin embargo, la elección de especies arbóreas adecuadas, así como un correcto manejo del dosel puede ser de amplio beneficio para los productores rurales.

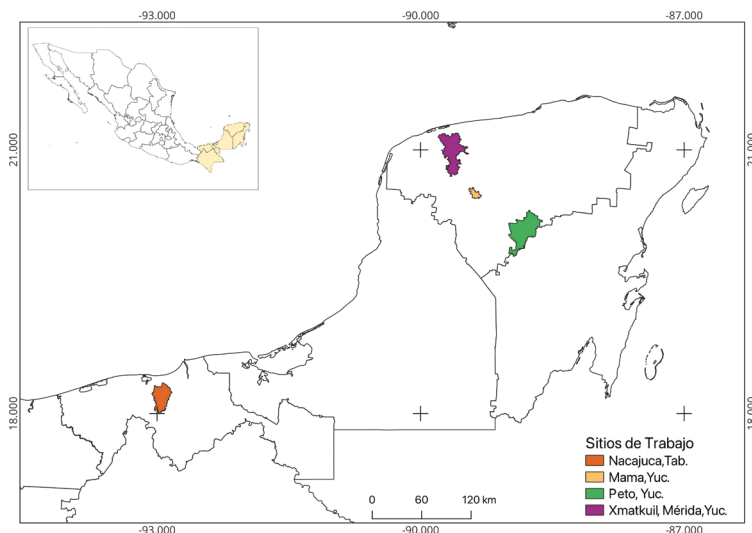
Por ejemplo, Xiu-Canché et al. (2023) establecieron dos especies arbóreas de la familia de las leguminosas (*Guazuma ulmifolia* Lam. y *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit) en un sistema agroforestal para el cultivo del maíz. Estas especies fueron elegidas porque pueden contribuir a la fijación de nitrógenos al suelo, su follaje puede ser utilizado como alimento para ganado menor, y también tiene una rápida descomposición en el suelo, por lo que puede ser una fuente importante de nutrientes para el mismo. Los autores demostraron que manteniendo la altura de los árboles controlada mediante podas (no más de 1.5 m), no había competencia por luz entre estos y el maíz, además de que la aplicación del follaje como cobertura, contribuía al control de malezas.

Por tanto, es fundamental generar información que permita la revalorización de estas prácticas de manejo para el cultivo del maíz en función del rol que pueden jugar como estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático en el ambiente rural, donde también pueden contribuir a la generación de una dieta balanceada, tanto de los productos obtenidos de la milpa, como de la cría de animales de traspatio que pueden ser alimentados parcialmente con especies arbóreas establecidas en sistemas agroforestales para el cultivo del maíz.

Revalorización de la milpa y exploración de sistemas agroforestales para la producción de maíz

Como una forma de revalorizar la práctica de la milpa, fomentar el uso de sistemas agroforestales para el cultivo del maíz y aportar al conocimiento sobre las ventajas que ambos sistemas pueden ofrecer para reducir los posi-

Figura 9.3. Sitios del sur-sureste de México en los que se desarrollaron trabajos que comparan la modificación microclimática en el sitio de cultivo y desempeño fisiológico del maíz bajo un sistema en monocultivo vs. milpa (Nacajuca, Mama y Peto) y en un sistema agroforestal (Xmatkuil)



Nota: el caso de Xmatkuil, se señala el municipio de Mérida, al que pertenece la localidad. Para más detalles consultar a Pérez-Hernández et al. (2021); Xiu-Canché et al. (2023); Mares-Guerrero et al. (2024).

bles impactos del cambio climático en la agricultura rural y sustentabilidad alimentaria en los pequeños productores, se analizan tres trabajos que, entre otras cosas, comparan el funcionamiento fisiológico y productivo del maíz bajo condiciones climáticas y edáficas contrastantes en cuatro sitios del sur-sureste de México (figura 9.3), como consecuencia de la variación microclimáticas producto del sistema de manejo utilizado para su cultivo. Estos trabajos son:

1. El primer caso se desarrolló en Tucta, Nacajuca, Tabasco: sitio que cuenta con 1 730 mm de precipitación total anual (PTA), 0 % de pedregosidad y una profundidad del suelo de más de 45 cm (Pérez-Hernández et al., 2021).
2. El segundo caso se desarrolló en Mama, Yucatán que presenta 1 100 mm de PTA, 5 % de pedregosidad y 37.5 cm de profundidad en el sitio de estudio; y Peto, Yucatán con 1 230 mm de PTA, 60 % de

- pedregosidad y profundidad de 16.6 cm en el sitio de trabajo (Mares-Guerrero et al., 2024),
3. El tercer trabajo se desarrolló en Xmatkuil, Mérida, Yucatán, que cuenta con 900 mm de PTA, 45 % de pedregosidad y 15 cm de profundidad (Xiu-Canché et al., 2023).

En todos los casos se utilizaron maíces nativos (Tuxpeño en el caso de Nacajuca, Tabasco, y Nal Xoy blanco para los tres sitios de Yucatán) a una densidad de 45 000 plantas por ha. En los dos primeros trabajos (Tabasco, Peto y Mama) se establecieron cuadrantes de 10 x 10 m², en los que se sembró maíz en monocultivo y maíz en combinación con frijol y calabaza (variedades utilizadas por los productores locales en todos los casos), por triplicado para cada tratamiento y sitio experimental. El cultivo fue de temporal, sin aplicación de agroquímicos, y con control manual de arvenses en lo que la calabaza se desarrolló; el manejo fue acorde a las prácticas tradicionales locales y se tuvo apoyo de los productores.

El trabajo en Xmatkuil se desarrolló en un sistema agroforestal en callejón compuesto por individuos adultos de *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit y *Guazuma ulmifolia* Lam, especies cuya biomasa foliar es aprovechada para la alimentación de ganado menor, y que se ha demostrado que puede descomponerse rápidamente en el suelo, aportando nutrientes al mismo (Petit-Aldana et al., 2012). Estos árboles se mantuvieron a una altura no mayor a 1.5 metros desde su establecimiento, a través de podas regulares. Entre filas de árboles se establecieron plantas de maíz en monocultivo correspondiente a la misma variedad que en Peto y Mama, y a la misma densidad que en los trabajos anteriores. La materia orgánica obtenida de las podas de las especies arbóreas se aplicó al suelo como cobertura, a fin de controlar el establecimiento de malezas, contribuir a la retención de agua y aportar nutrientes al suelo; se estableció un control sin aplicación de dicha cobertura (Xiu-Canché et al., 2023; 2025).

En todos los casos se midió el microclima (temperatura y humedad relativa del aire, temperatura y contenido volumétrico de agua en suelo, formación de rocío, así como el déficit de presión de vapor de agua atmosférico), y parámetros fisiológicos (tabla 9.1) que se relacionan con la productividad del maíz. Para efectos de este trabajo, se presentan los resultados

obtenidos cuando las plantas de frijol y calabaza se encontraban bien desarrolladas y el maíz empezaba la formación de mazorcas (día 99 y día 75 contados a partir de la siembra del maíz para Nacajuca, Tabasco, y todos los sitios de Yucatán, respectivamente). Para más detalles del diseño experimental consultar (Pérez-Hernández et al., 2021; Xiu-Canché et al., 2023; Mares-Guerrero et al., 2024).

Tabla 9.1. *Parámetros fisiológicos que fueron incluidos en el capítulo, así como sus siglas, definición y uso*

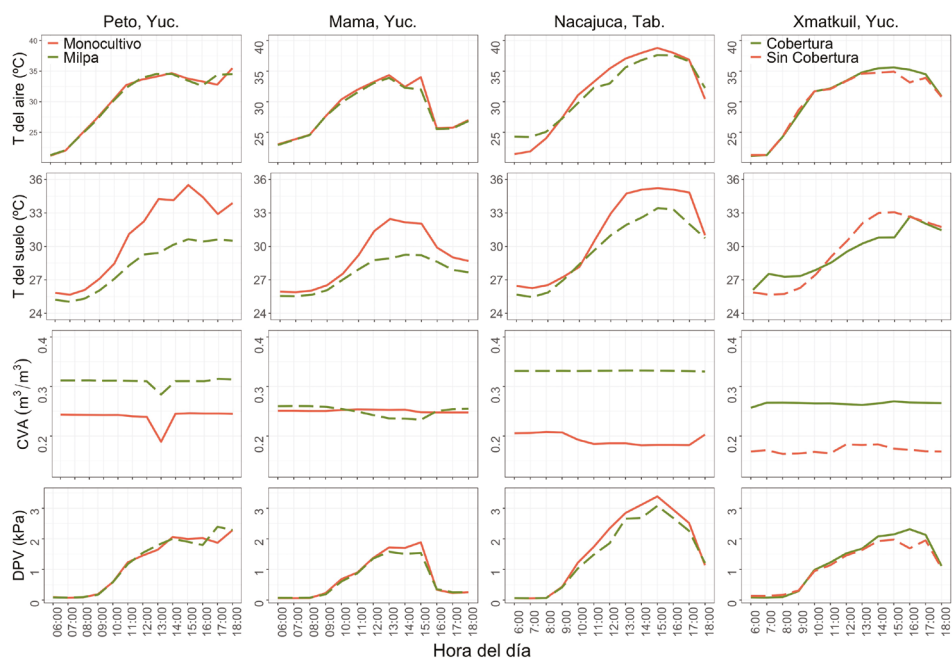
Parámetro	Siglas	Definición y uso
Asimilación de CO ₂	A	Indica la cantidad de CO ₂ que la hoja asimila al abrir los estomas durante el proceso de fotosíntesis. A mayor asimilación, se asumirá que habrá mayor cantidad de azúcares producto de la fotosíntesis y, por tanto, mayor producción (en este trabajo).
Transpiración	E	Indica la cantidad de agua que pierde la hoja en forma de vapor al abrir los estomas durante el proceso de fotosíntesis. Este parámetro se relaciona con la cantidad de agua en suelo (a mayor disponibilidad, se esperaría mayor transpiración) y con el DPV (a mayor DPV, mayor transpiración).
Eficiencia en el uso del agua	EUA	Indica la cantidad de moléculas de agua que se pierden por cada molécula de CO ₂ absorbida durante el intercambio de gases en la hoja. A menor pérdida de agua por ganancia de CO ₂ , mayor será la eficiencia.
Concentración de clorofila foliar	CC	Indica la concentración de clorofila en la hoja. A mayor concentración, mayor capacidad fotosintética.
Contenido relativo de agua foliar	CRA	Es el porcentaje de agua que se puede encontrar en una hoja, respecto al total que podría llegar a tener. Es un indicativo del estado hídrico de las plantas.
Potencial hídrico foliar	Ψ	Es una medida del potencial energético del agua respecto al agua pura. Es la cantidad de agua que podría ser usada en procesos metabólicos. Se mide en números negativos, mientras más cercano a cero, mayor disponibilidad de agua.

Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar en la figura 9.4, no se encontraron diferencias en la temperatura del aire entre el monocultivo y la milpa, salvo en Nacajuca, Tabasco, donde el monocultivo presentó una temperatura del aire más elevada que la milpa. La temperatura del suelo fue mayor en el monocultivo, respecto a la milpa en todos los casos; las diferencias fueron de hasta 5 °C en Peto, Yucatán (el sitio más pedregoso), 2.5 °C en Mama, Yucatán y 2 °C en Nacajuca, Tabasco (el sitio más húmedo), mientras que la aplicación de cobertura al suelo en el sistema agroforestal de maíz (Xmatkuil), redujo su temperatura hasta en 2.2 °C. Este mismo patrón se observó en el contenido volumétrico de agua en el suelo (CVA), en donde la milpa retuvo hasta 45 % mayor cantidad de agua en la milpa con un suelo cercano a

la saturación en Nacajuca, y hasta 22 % en el caso del sitio más pedregoso (Peto), mientras que en Xmatkuil, fue hasta 35.5% mayor en suelo con cobertura respecto al que no lo tiene. Además, en la mayoría de los casos, esta alta disponibilidad de agua en el suelo fue constante a lo largo de todo el día. Finalmente, el déficit de presión de vapor de agua (DPV) fue similar entre manejos a excepción de Nacajuca donde se registró una mayor demanda evaporativa en el monocultivo.

Figura 9.4. Microclima registrado entre las 6:00 y 18:00 h en tres sistemas de cultivo de maíz nativo: monocultivo, milpa (Peto, Mama y Nacajuca) y sistema agroforestal (Xmatkuil) en cuatro sitios de trabajo del sureste de México



Nota: T del aire: temperatura del aire; T del suelo: temperatura del suelo; CVA: contenido volumétrico de agua en suelo; DPV: déficit de presión de vapor de agua calculado, según H. Jones (2014).

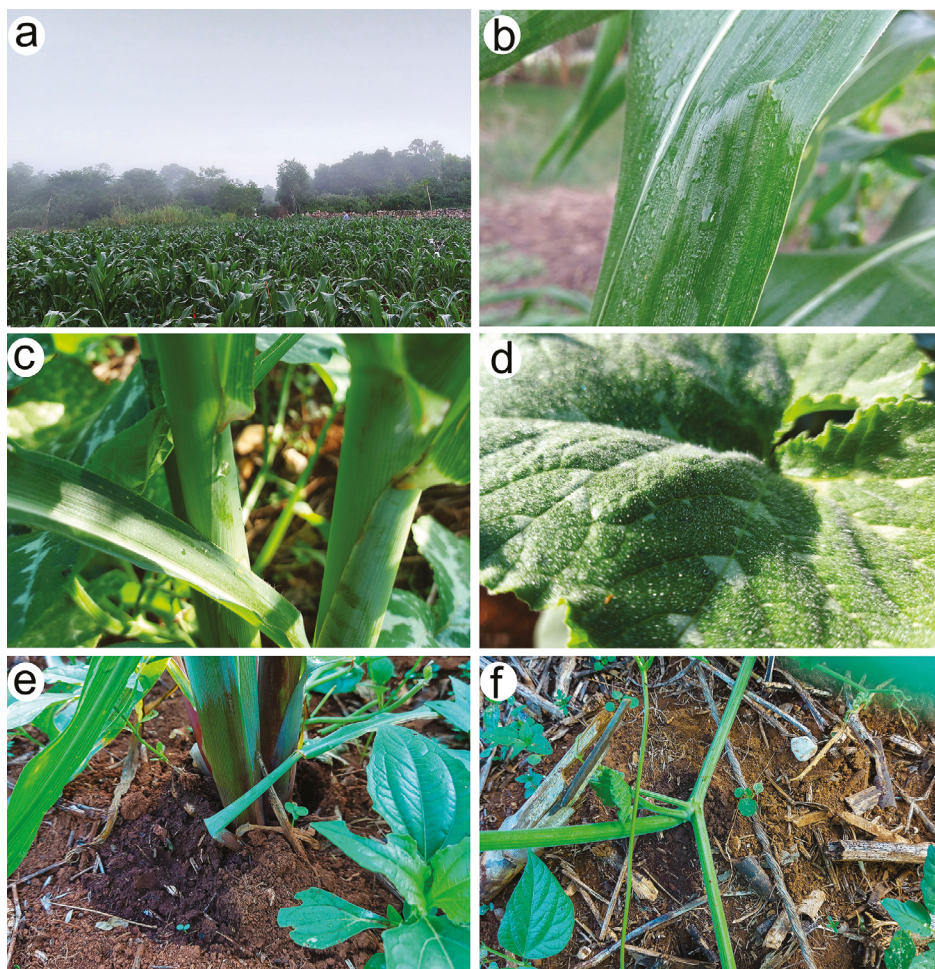
En general, se pudo observar que el manejo bajo el sistema milpa, así como la aplicación de cobertura en el sistema agroforestal ofrecen mejores condiciones microclimáticas (menor temperatura del suelo, mayor disponibilidad de agua) respecto al monocultivo y a la carencia de cobertura en suelo, respectivamente.

Sin duda, la cobertura del suelo provista por las hojas de calabaza en el sistema milpa, así como la aplicación de cobertura al suelo en el sistema agroforestal, contribuyeron a reducir la cantidad de suelo desnudo y, por tanto, reducir la cantidad de luz solar incidente, lo que provocó una menor temperatura y mayor disponibilidad de agua para las plantas, aún en suelos con alta pedregosidad.

Si bien, de manera general, las plantas podrían desempeñar un rol importante en la pérdida de agua de suelo a través del proceso de transpiración (pérdida de agua en forma de vapor a través de las hojas), en el caso de Nacajuca en Tabasco, así como en Peto y Mama en Yucatán, se pudo observar que las hojas de las plantas jugaron un rol importante en la incorporación de agua al suelo. Lo anterior se debió a que la alta humedad presente en el aire (figura 9.5a), combinado con una temperatura de las hojas menor que la del aire, provocó que esa humedad se condensara sobre las hojas, formando gotas de agua (figura 9.5b, figura 9.5d). Estas gotas escurrieron hacia el suelo (figura 9.5c), lo que contribuyó a incrementar la humedad en el mismo (figura 9.5e, figura 9.5f). Particularmente, el tamaño de las hojas de maíz proporciona una gran superficie captadora de agua por el mecanismo antes mencionado, mientras que en el caso de la calabaza la forma de las hojas y estructura de los tallos pueden formar un embudo que también contribuye de manera significativa a la captación de agua del rocío. Por tanto, bajo ciertas condiciones de humedad y temperatura del aire, las plantas de la milpa podrían funcionar como antenas captadoras de agua y, al mismo tiempo, contribuir de manera significativa a mantener disponible ese recurso por más tiempo, en comparación con el monocultivo.

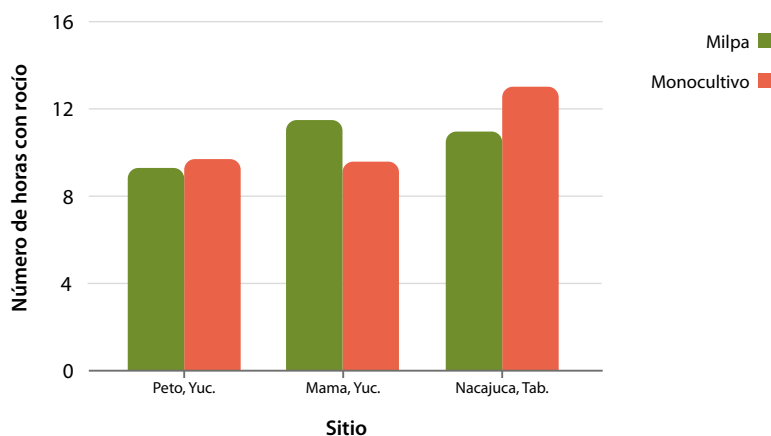
Lo anterior cobra relevancia si se considera que en los sitios de trabajo se registró formación de rocío durante toda la noche, e incluso un poco más de tiempo: en Peto se registraron entre 9.3 y 9.7 horas, en Mama entre 9.6 y 11.5 horas, mientras que en el caso de Nacajuca se registraron entre 11 y 13 horas (figura 9.6), lo que brinda una idea clara del periodo de tiempo en el que el agua puede ingresar al sistema de cultivo por la vía antes descrita.

Figura 9.5. (a) Imagen que ilustra la presencia de neblina a las 6:00 am sobre el sitio experimental de Mama, Yucatán; (b) ilustración de la condensación y formación de gotas de agua sobre las hojas de maíz; (c) gota de agua formada a partir de la formación de rocío sobre las hojas escurriendo hacia el suelo a través del tallo del maíz; (d) pequeñas gotas de agua sobre las hojas de calabaza; (e) suelo alrededor de la base del tallo de maíz que se humedeció a partir del agua que escurrió a través del tallo; (f) suelo que se humedeció alrededor del tallo de calabaza a partir del agua que escurrió sobre él.



Fuente: elaboración propia.

Figura 9.6. Número de horas con formación de rocío sobre hojas de maíz bajo dos tratamientos (monocultivo y milpa) en tres sitios experimentales del sur-sureste de México



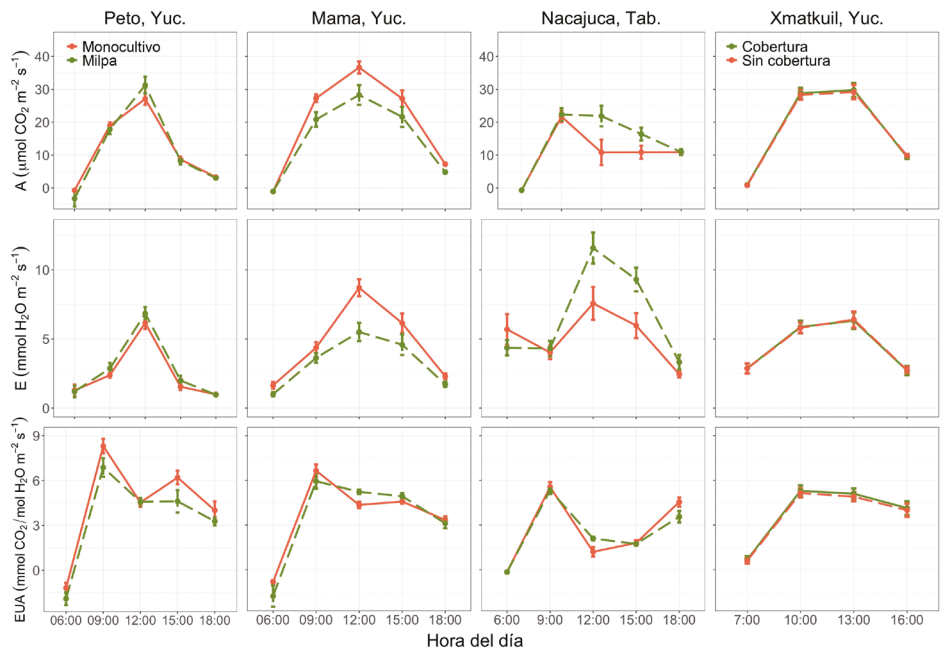
Fuente: elaboración propia a partir de los datos de Mares-Guerrero et al. (2024) y Pérez-Hernández et al. (2021).

Las condiciones microclimáticas descritas anteriormente tuvieron un efecto significativo sobre el desempeño fisiológico de las plantas de maíz. Como se observa en la figura 9.7, los maíces bajo monocultivo en Nacajuca tuvieron mayor tasa fotosintética la mayor parte del día, mientras que en Mama se observó lo contrario; en el caso de Peto no se encontraron diferencias entre plantas de ambos tratamientos. Este mismo patrón se observó en la cantidad de agua perdida por transpiración, donde las plantas bajo el sistema milpa presentaron una mayor transpiración en relación con las del monocultivo en Peto y Nacajuca, mientras que en Mama se observó lo contrario.

A pesar de lo anterior, al observar la eficiencia en el uso del agua (EUA) de las plantas de maíz, no se encontraron diferencias la mayor parte del día entre tratamientos (monocultivo vs. milpa), sin embargo, la plantas que presentaron la mayor EUA fueron las de Peto, sitio que presentó los suelos con mayor pedregosidad y menor profundidad respecto al resto. Si bien las plantas de maíz bajo monocultivo presentaron la mayor EUA en sitios como Peto, se debe recordar que esto implica una menor captación de CO_2 y, por tanto, menor producción de azúcares, lo que se podría reflejar en una menor productividad respecto a las plantas de la milpa, quienes tienen agua

suficiente en el suelo para compensar la pérdida por transpiración, lo que les permite incrementar la asimilación de CO_2 .

Figura 9.7. Asimilación de CO_2 (A), transpiración (E) y eficiencia en el uso del agua (EUA) registrados en cuatro sitios experimentales del sur-sureste de México en plantas de maíz bajo distintos tratamientos de cultivo (milpa y monocultivo para Peto, Mama y Nacajuca; aplicación o no de cobertura con biomasa foliar de dos especies arbóreas para Xmatkuil). Los datos son promedio $\pm$ EE



Fuente: elaboración propia a partir de los datos de Mares-Guerrero et al. (2024); Pérez-Hernández et al. (2021) y Xiu-Canché et al. (2025).

La clorofila es el pigmento responsable de la captación de luz y su transformación a energía en el proceso fotosintético y, por tanto, fundamental en la producción de azúcares en las plantas (Manrique, 2003; Jones, 2014). La concentración de clorofila (CC) en las hojas de las plantas de maíz fue mayor en las que se encontraron en las milpas de Yucatán (Peto y Mama), mientras que en Nacajuca no se registraron diferencias entre manejos; en el sistema agroforestal de Xmatkuil, la mayor CC se registró en plantas donde se aplicó cobertura (tabla 9.2). La concentración de clorofila se relaciona con la disponibilidad de nitrógeno en el suelo (Evans, 1989; Jones, 2014; Wang et al.,

2021); el frijol, en asociación con bacterias del género *Rhizobium*, tienen la capacidad de fijar nitrógeno atmosférico, lo que puede incrementar la disponibilidad de este elemento para las plantas de maíz y calabaza, lo que se refleja en mayor concentración de clorofila en plantas de la milpa. Lo anterior puede ser de gran relevancia en sitios con suelos poco profundos y con alta pedregosidad como los de la Península de Yucatán; en el caso de Nacajuca, el sitio experimental fue previamente utilizado para el pastoreo de ganado bovino, lo que pudo contribuir a la concentración de clorofila encontrada por el contenido de nitrógeno que pudo haber en el suelo.

De igual forma, el contenido relativo de agua (CRA; tabla 9.2) fue mayor en plantas de la milpa en Peto y Mama, mientras que en Nacajuca y en el sistema agroforestal no se registraron diferencias. En este sentido, el potencial hídrico foliar fue mayor en plantas de maíz bajo el sistema milpa en Peto y en el sistema agroforestal con aplicación de cobertura (Ψ ; tabla 9.2). Lo anterior refleja que la alta disponibilidad de agua en suelo aprovechada por las plantas de maíz para realizar sus procesos metabólicos, desde la fotosíntesis hasta la regulación de temperatura a través de la transpiración.

Tabla 9.2. Concentración de clorofila (CC), contenido relativo de agua (CRA) y potencial hídrico foliar (Ψ) en plantas de maíz bajo distintos manejos en cuatro sitios experimentales del sur-sureste de México. Los datos son promedio $\pm$ EE. Letras diferentes denotan diferencias significativas entre tratamientos para un mismo sitio experimental (ANOVA simple con $\alpha=0.05$)

Sitio	Maíz	Manejo	CC	CRA	Ψ (MPa)
Peto, Yucatán	Nal Xoy	Milpa	347.8 $\pm$ 23.47 ^a	90.86 $\pm$ 1.3 ^a	-1.39 $\pm$ 0.08 ^a
		Monocultivo	250.5 $\pm$ 7.31 ^b	71.71 $\pm$ 3.7 ^b	-1.60 $\pm$ 0.10 ^b
Mama, Yucatán	Nal Xoy	Milpa	449.8 $\pm$ 15.9 ^a	82.19 $\pm$ 1.9 ^a	-1.23 $\pm$ 0.03 ^a
		Monocultivo	418.5 $\pm$ 23.02 ^a	73.12 $\pm$ 2.6 ^b	-1.26 $\pm$ 0.10 ^a
Xmatkuil, Yucatán	Nal Xoy	Cobertura	400.8 $\pm$ 31.9 ^a	79.85 $\pm$ 4.7 ^a	-0.75 $\pm$ 0.43 ^a
		Sin cobertura	314.9 $\pm$ 23.2 ^b	87.52 $\pm$ 3.5 ^a	-1.28 $\pm$ 0.09 ^a
Nacajuca, Tabasco	Tuxpeño	Milpa	326.3 $\pm$ 20.2 ^a	92.84 $\pm$ 1.5 ^a	-0.99 $\pm$ 0.13 ^a
		Monocultivo	438.8 $\pm$ 32.7 ^a	94.39 $\pm$ 0.9 ^a	-1.72 $\pm$ 0.14 ^b

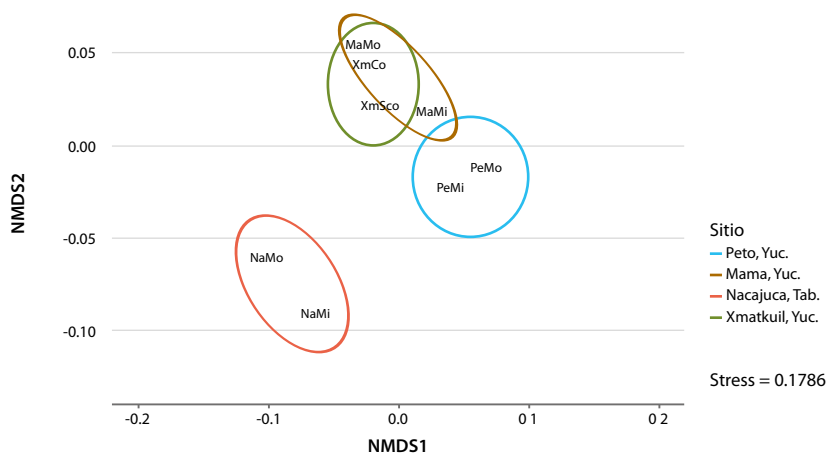
Fuente: elaboración propia.

Un análisis no métrico de escala multidimensional (NMDS por sus siglas en inglés) permitió observar las estrategias fisiológicas que siguieron las plantas de maíz por sitio y tipo de manejo. En este sentido, Mares-Guerrero

et al. (2024) reportaron un comportamiento distinto de las plantas según el tipo de manejo y sitio de trabajo, particularmente en el sitio más pedregoso donde las plantas bajo el sistema milpa presentaron una mayor homogeneidad en su comportamiento, respecto al monocultivo. Algo similar reportaron Pérez-Hernández et al. (2021) para Nacajuca, mientras que para el sistema agroforestal de Xmatkuil se encontró que el comportamiento de las plantas fue más homogéneo cuando se aplicó cobertura (datos no mostrados).

De manera general, las plantas de maíz en Nacajuca se comportaron fisiológicamente de manera muy distinta a las plantas establecidas en Yucatán (figura 9.8), lo cual cobra sentido si se considera que son razas de maíz y condiciones ambientales distintas. Sin embargo, algo similar se encontró en las plantas establecidas en Peto (el sitio con el suelo más pedregoso y menos profundo), que se comportaron distinto a las plantas establecidas en Mama; estas últimas plantas tuvieron un comportamiento muy similar a lo registrado en el sistema agroforestal.

Figura 9.8. Análisis no métrico de escala multidimensional



Nota: análisis no métrico de escala multidimensional (NMDS por sus siglas en inglés) construido a partir de datos de totales diarios de asimilación de CO_2 y transpiración, eficiencia en el uso del agua y registros de potencial hídrico, contenido relativo de agua y potencial hídrico foliar en plantas de Maíz bajo distintos manejos en cuatro sitios del sur-sureste de México. PeMo: monocultivo en Peto, Yucatán; PeMi: milpa en Peto; MaMo: monocultivo en Mama, Yucatán; MaMi: Milpa Mama; NaMo: monocultivo en Nacajuca, Tabasco; Nami: milpa en Nacajuca; XmCo: monocultivo en sistema agroforestal con aplicación de cobertura en Xmatkuil, Yucatán; XmSco: monocultivo en sistema agroforestal sin aplicación de cobertura en Xmatkuil, Yucatán. Las elipses representan el grado de dispersión de los datos para cada sitio de trabajo, construidos a partir de una matriz de covarianza de la salida de datos del NMDS.

Los resultados anteriores muestran que el manejo agroforestal con aplicación de cobertura con biomasa de especies leguminosas puede proveer condiciones microclimáticas similares a las que se encuentran en el sistema milpa establecida en suelos de profundidad media en una región relativamente seca como la Península de Yucatán, aun cuando se establezcan en suelos menos profundos y con cierto grado de pedregosidad. De igual forma, permite apreciar la plasticidad y adaptación de las variedades locales de maíz a condiciones heterogéneas dentro de la región en la que se establecieron.

Consideraciones finales

El cambio climático global pone en riesgo el suministro de alimentos a nivel mundial derivado de una disminución en el rendimiento de los cultivos tropicales, lo que pone en riesgo los sistemas alimentarios, medios de subsistencia y salud humana (Masson-Delmotte et al., 2022). En este contexto, la población rural es altamente vulnerable por carecer de los medios para hacer frente a dicha variación climática.

Los trabajos antes señalados demuestran la importancia del manejo del microclima, como potencial promotor de condiciones favorables para el cultivo de alimentos como el maíz. La milpa demostró modificar de manera significativa el microclima, particularmente en lo relativo a la disponibilidad de agua en suelo, lo que puede favorecer el desempeño fisiológico y productivo del maíz y plantas asociadas, particularmente en suelos pedregosos y poco profundos donde el cultivo se realiza bajo condiciones ambientales adversas para las plantas. Además, la diversidad de alimentos obtenidos de la milpa favorece la integración de una dieta balanceada para los pequeños productores.

También se realza la importancia de los maíces nativos como motor de la sustentabilidad alimentaria en el contexto rural. Más allá de las estadísticas oficiales sobre el cultivo de al menos tres tipos de maíz (blanco, amarillo y palomero) como su rendimiento, superficie sembrada y producción total, existe muy poca información sobre los maíces nativos en este sentido, demostrando poco interés o complejidad para recabar información en este sentido, a pesar de que se estima que el 65 % de la superficie sembrada de

maíz en México corresponde a maíces nativos cuyo principal destino es el autoconsumo y el abastecimiento de mercados locales (Guadarrama et al., 2014; López-Torres et al., 2016).

Es de fundamental importancia el rescate, revalorización y consumo de especies nativas locales por varios motivos: (1) aporte de las plantas nativas a la tolerancia al cambio climático, (2) conservación de la agrobiodiversidad silvestre y cultivada, (3) la adaptación que los humanos tenemos a los alimentos nativos que históricamente fueron domesticados en la región geográfica en la que nacimos y, por tanto, los aportes nutrimentales obtenidos a partir de la dieta.

Un adecuado manejo de los sistemas agroforestales como la poda y aplicación de cobertura al suelo demostró tener una influencia favorable en la retención de agua, incorporación de nutrientes al suelo y control de malezas, por lo que puede ser una excelente alternativa cuando los productores se interesan en la cría de animales como complemento al cultivo de maíz. Finalmente, se debe recordar que los sistemas de agricultura tradicional son fundamentales como sustento de los medios de vida, particularmente en la agricultura rural, al conservar el conocimiento, proteger paisajes ya de por sí frágiles por diversas actividades humanas, así como el rol que pueden jugar en la conservación de la agrobiodiversidad (FAO, 2018).

Agradecimientos

A los sres. David Kumul, Francisco Teh y German Pérez por las facilidades brindadas para el desarrollo de los diversos experimentos en sus parcelas. A Robert Us, Denisse Morales, Celene Espadas, Alfredo Jiménez por su apoyo en laboratorio y campo, así como a Casandra Reyes, Jorge Mendoza, David Álvarez, Hans van der Wal, Juan Manuel Pat, Ulises Rodríguez y Rosaura Aparicio por sus aportes a diversas secciones de los trabajos analizados. A El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR), Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY), Laboratorio Nacional de Innovación Ecológica para la Sustentabilidad (LANIES) y al Laboratorio de Ecofisiología Vegetal y Sistemas Agroforestales (LEVSA) de ECOSUR por todas las facilidades brindadas para el desarrollo de estos trabajos.

Referencias

- Aguilar, J., Illsley, C., y Marielle, C. (2003). Los sistemas agrícolas de maíz y sus procesos técnicos. En G. Galicia, G. Esteva y C. Marielle (Eds.), *Sin maíz no hay país* (pp. 83-122.). Consejo Nacional para la Cultura y las Artes: Dirección General de Culturas Populares e Indígenas: Museo Nacional de Culturas Populares.
- Almeida, A.-A., y Valle, R. (2007). Ecophysiology of the cacao tree. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 19(4), 425–448. <https://doi.org/https://doi.org/10.1590/S1677-04202007000400011>
- Altieri, M. (2018). *Agroecology. The Science Of Sustainable Agriculture* (Second edition). CRC Press Taylor & Francis Group. <https://doi.org/https://doi.org/10.1201/9780429495465>
- Bailey, R., Benton, T., Challinor, A., Elliott, J., Gustafson, D., Hiller, B., Jones, A., Jahn, M., Kent, C., Lewis, C., Meacham, T., Rivington, M., Robson, D., Tiffin, R., y Wuebbles, D. (2015). *Extreme weather and resilience of the global food system. Final Project Report from the UK-US Taskforce on Extreme Weather and Global Food System Resilience, The Global Food Security programme, UK*. www.foodsecurity.ac.uk/assets/pdfs/extreme-weather-resilience-of-global-food-system.pdf
- Brown, R. H. (1978). A Difference in N Use Efficiency in C_3 and C_4 Plants and its Implications in Adaptation and Evolution. *Crop Science*, 18, 93–98. <https://doi.org/https://doi.org/10.2135/cropsci1978.0011183X001800010025x>
- Brush, S. (1991). A Farmer-Based Approach to Conserving Crop Germplasm. *Economic Botany*, 45(2). <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/BF02862044>
- Cach-Pérez, M. J., Villanueva, G., Alayón, J. A., Nahed, J., y Casanova-Lugo, F. (2021). Microclimate Management: From Traditional Agriculture to Livestock Systems in Tropical Environments. En C. M. Galanakis (Ed.), *Environment and Climate-smart Food Production* (pp. 1–29). Springer Nature. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-030-71571-7_1
- Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo CIMMYT. (2020). *La milpa, tradición que impulsa el futuro*. CIMMYT. <https://idp.cimmyt.org/la-milpa-tradicion-que-impulsa-el-futuro/>
- Colunga-García Marín, P., y Zizumbo-Villarreal, D. (1993). La evolución de las plantas bajo selección artificial y manejo agrícola. En E. Leff y Carabias, J. (Eds.), *Cultura y Manejo Sustentable de los Recursos Naturales* (vol. 1, pp. 123–163). Miguel Ángel Porrúa.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (2011). *Distribución de teocintle en México. Mapa realizado con información del Proyecto Global de Maíces Nativos*. Conabio.
- (2015). *Datos obtenidos del Proyecto Global de Maíces Nativos*. Distribución de La Raza de Maíz. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- (2020). *Razas de maíz de México*. <https://www.biodiversidad.gob.mx/diversidad/alimentos/maices/razas-de-maiz>

- Costa, F., Vidal, R., De Almeida, N., Veasey, E. A., De Oliveira, F., y Zucchi, M. I. (2024). Archaeological findings show the extent of primitive characteristics of maize in South America. *Science Advances*, 10, 1–9. <https://doi.org/https://doi.org/10.1126/sciadv.adn1466>
- Da Fonseca, R. R., Smith, B. D., Wales, N., Cappellini, E., Skoglund, P., Fumagalli, M., Samaniego, J. A., Carøe, C., Ávila-Arcos, M. C., Hufnagel, D. E., Korneliussen, T. S., Vieira, F. G., Jakobsson, M., Arriaza, B., Willerslev, E., Nielsen, R., Hufford, M. B., Albrechtsen, A., Ross-Ibarra, J., y Gilbert, M. T. P. (2015). The origin and evolution of maize in the South-western United States. *Nature Plants*, 1. <https://doi.org/10.1038/nplants.2014.3>
- Evans, J. R. (1989). Photosynthesis and nitrogen relationships in leaves of C_3 plants. *Oecologia*, 78, 9–19. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/BF00377192>
- FAO. (2018). *Globally important agriculture heritage systems. Combining agricultural biodiversity, resilient ecosystems, traditional farming practices and cultural identity*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/0ef0c947-d959-4be0-9a4a-1c2633262b2e/content>
- Foolad, M. R. (2005). Breeding for abiotic stress tolerances in tomato. En M. Ashraf y P. J. Harris (Eds.), *Abiotic stresses: plant resistance through breeding and molecular approaches* (pp. 613–684). The Haworth Press Inc.
- Gepts, P. (2004). Crop Domestication as a Long-term Selection Experiment. *Plant Breeding*, 24, 1–44.
- Gliessman, S. R. (1983). Allelopathic interactions in crop-weed mixtures. *Journal of Chemical Ecology*, 9, 991–999. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/BF00982206>
- González-Merino, A., y Ávila-Castañeda, J. F. (2014). El maíz en Estados Unidos y en México. Hegemonía en la producción de un cultivo. *Argumentos*, 27(75), 215–237.
- Guadarrama, A., Aragón, F., y Willcox, M. (2014). Mejoramiento de maíces nativos. *Enlace*, 22, 11–15.
- Hammer, K. (1984). Das domestikationssyndrom. *Die Kulturpflanze*, 32, 11–34. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/BF02098682>
- Harlan, J. (1975). *Crops and man*. Foundation for modern crop science series. American Society of Agronomy.
- Harlan, J. R. (1971). Agricultural Origins: Centers and Noncenters. *Science*, 14, 468–474. <https://doi.org/10.1126/science.174.4008.468>
- Hoy, C. W. (2015). Agroecosystem health, agroecosystem resilience, and food security. *Journal of Environmental Studies and Sciences*, 5(4), 623–635. <https://doi.org/10.1007/s13412-015-0322-0>
- IFAD (Fondo Internacional de Desarrollo Agrícola). (2021). *Transforming food systems for rural prosperity: Rural development report 2021*. <https://www.ifad.org/documents/38714170/43704363/rdr2021.pdf/>
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (2022). *Censo agropecuario 2022. Resultados definitivos*. INEGI. https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/ca/2022/doc/ca2022_rdnal.pdf

- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., y Miller, H. L, eds.). IPCC. Cambridge University Press.
- Jarma-Orozco, A., Cardona, C., y Araméndiz, H. (2012). Effect of climate change on the physiology of crop plants: a review. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación*, 15(1), 63–76.
- Jiménez-Pérez, A., Cach-Pérez, M. J., Valdez-Hernández, M., y De la Rosa-Manzano, E. (2019). Effect of canopy management in the water status of cacao (*Theobroma cacao*) and the microclimate within the crop area. *Botanical Sciences*, 97(4), 701–710. <https://doi.org/10.17129/botsci.2256>
- Jones, H. (2014). *Plant and microclimate: a quantitative approach to environmental plants physiology* (3rd ed.). Cambridge University Press.
- Jones, M. (1985). Plant microclimate. En Coombs, J., Hall, D.O., Long, S.P., y Scurlock, J.M.O. (Eds.), *Techniques in Bioproductivity and Photosynthesis* (pp. 26–40). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-031999-5.50013-3>
- Kato, T., Mapes, C., Mera, L., Serratos, J., y Bye, R. (2009). *Origen y diversificación del Maíz: una revisión analítica*. Universidad Nacional Autónoma de México, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Kistler, L., Maezumi, S.Y., Gregorio De Souza, J., Przelomska, N.A.S., Malaquias Costa, F., Smith, O., Loisel, H., Ramos-Madrugal, J., Wales, N., Ribeiro, E.R., Morrison, R.R., Grimaldo, C., Prous, A.P., Arriaza, B., Thomas, M., Gilbert, P., De Oliveira Freitas, F., y Allaby, R.G. (2018). Multiproxy evidence highlights a complex evolutionary legacy of maize in South America. *Science*, 362, 1309–1313. <https://doi.org/10.1126/science.aav0207>
- Kistler, L., Thakar, H., Vanderwarker, A., Domic, A., Bergström, A., George, R., Harper, T., Allaby, R., Hirth, K., y Kennett, D. (2020). Archaeological Central American maize genomes suggest ancient gene flow from South America. *PNAS*, 117(52), 33124–33129. <https://doi.org/https://doi.org/10.1073/pnas.201556011>
- Larcher, W. (2003). *Physiological Plant Ecology: Ecophysiology and Stress Physiology of Functional Groups* (4ª ed.). Springer.
- Ledesma, N. A., Nakata, M., y Sugiyama, N. (2008). Effect of high temperature stress on the reproductive growth of strawberry cvs. “Nyoho” and “Toyonoka.” *Scientia Horticulturae*, 116(2), 186–193. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2007.12.010>
- Lombardini, L. (2006). Ecophysiology of plants in dry environments. En P. D’odirico y A. Porporato (Eds.), *Dryland Ecohydrology* (pp. 47–66). Springer.
- López-Torres, J., Rendón-Medel, R., y Camacho, T. (2016). The marketing of specialty corns in Mexico: current conditions and prospects. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 15, 3075–3088. <https://doi.org/https://doi.org/10.29312/remexca.v0i15.427>
- Mall, R. K., Gupta, A., y Sonkar, G. (2017). Effect of climate change on agricultural crops. In *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering: Crop Modification, Nutrition, and Food Production* (pp. 23–46). Elsevier B. V. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63661-4.00002-5>

- Manrique, E. (2003). Los pigmentos fotosintéticos, algo más que la captación de luz para la fotosíntesis. *Ecosistemas*, 12(1), 1–11. <https://www.aeet.org/ecosistemas/031/informe4.htm>
- Mares-Guerrero, A. A., Cach-Pérez, M. J., Reyes-García, C., y Van der Wal, H. (2024). Respuesta fisiológica del maíz en monocultivo y milpa en suelos superficiales y profundos de Yucatán, México. *Botanical Sciences*, 102(1), 144–161. <https://doi.org/10.17129/botsci.3365>
- Mariaca, R. (2011). La milpa en el sur de México. *Ecofronteras*, 43, 22–26. <https://revistas.ecosur.mx/ecofronteras/index.php/eco/article/view/732>
- Marsal, J., y Girona, J. (1997). Effects of water stress cycles on turgor maintenance processes in pear leaves (*Pyrus communis*). *Tree Physiology*, 17, 327–333. <https://doi.org/https://doi.org/10.1093/treephys/17.5.327>
- Masson-Delmotte, V., Pörtner, H.O., Skea, J., Slade, R., Ferrat, M., Neogi, S., Portugal, J., Kissick, K., Calvo, E., Connors, S., Haughey, E., Pathak, M., Vyas, P., Belkacemi, M., Zhai, P., Roberts, D., Shukla, P. R., van Diemen, R., Luz, S., ... Malley, J. (2022). Climate Change and Land: An IPCC Special Report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. En *Climate Change and Land: An IPCC Special Report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157988>
- Mateos-Maces, L., Castillo-González, F., Chaves, J. L., Estrada-Gómez, J. A., y Livera-Muñoz, M. (2016). Manejo y aprovechamiento de la agrobiodiversidad en el sistema milpa del sureste de México. *Acta Agronomica*, 65(4), 413–421. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.15446/acag.v65n4.50984>
- Matos-Moctezuma, E. (1994). Mesoamérica. In Manzanilla, L. y López-Luján, L. (eds.), *Historia Antigua de México: El México antiguo, sus áreas culturales, los orígenes y el horizonte preclásico* (Vol. 1, pp. 49–74). Instituto Nacional de Antropología e Historia, México.
- Mbow, C., Rosenzweig, C., Barioni, L. G., Benton, T. G., Herrero, M., Krishnapillai, M., Liwenga, E., Pradhan, P., Rivera-Ferre, M.G., Sapkota, T., Tubiello, F. N., y Xu, Y. (2019). Food security. En Shukla, P. R., Skea, J., Calvo-Buendia, E., Masson-Delmotte, V., Pörtner, H.O., Roberts, D. C., Zhai, P., Slade, R., Connors, S., van Diemen, R., Ferrat, M., Haughey, E., Luz, S., Neogi, S., Pathak, M., Petzold, J., Portugal, J., Vyas, P., Huntley, E., ... Malley, J. (Eds.), *Climate Change and Land: an-IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems* (pp. 437–550). IPCC. <https://www.ipcc.ch/srccl/>
- Mera, L., y Mapes, C. (2009). El Maíz. Aspectos biológicos. En T. Kato, C. Mapes, L. Mera, J. Serratos y R. Bye (Eds.), *Origen y diversificación del maíz: una revisión analítica* (Primera edición, pp. 19–31). Universidad Nacional Autónoma de México, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.

- Mislan, K. A. S., y Helmuth, B. (2008). Microclimate. En S. E. Jørgensen y B. D. Fath (Eds.), *Encyclopedia of Ecology, Five-Volume Set* (pp. 2389–2393). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-008045405-4.00520-6>
- Naiman, R. J., Décamps, H., McClain, M. E., y Likens, G. E. (2005). Biotic functions of Riparia. En R. J. Naiman, H. Décamps, M. E. McClain y G. E. Likens (Eds.), *Riparia* (pp. 125–158). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-012663315-3/50006-x>
- Nascimento, W.M., Cantliffe, D.J., y Huber, D.J. (2000). Thermotolerance in lettuce seeds: Association with ethylene and endo- β -mannanase. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 125(4), 518–524. <https://doi.org/10.21273/jashs.125.4.518>
- Oliver, M. J., Cushman, J. C., y Koster, K. L. (2010). Dehydration tolerance in plants. In Sunkar, R. (ed.), *Plant Stress Tolerance* (vol. 639, pp. 3–24). Humana Press. https://doi.org/10.1007/978-1-60761-702-0_1
- Peraza-Villarreal, H., Casas, A., Lindig-Cisneros, R., y Orozco-Segovia, A. (2019). The marceño agroecosystem: Traditional maize production and wetland management in Tabasco, Mexico. *Sustainability (Switzerland)*, 11(7). <https://doi.org/10.3390/su11071978>
- Pérez-Hernández, R., Cach-Pérez, M. J., Aparicio-Fabre, R., Van der Wal, H., y Rodríguez-Robles, U. (2021). Physiological and microclimatic effects of different agricultural management practices with maize. *Botanical Sciences*, 99(1), 132–148. <https://doi.org/10.17129/botsci.2640>
- Petit-Aldana, J., Uribe-Valle, G., Casanova-Lugo, F., Solorio-Sánchez, J., y Ramírez-Avilés, L. (2012). Descomposición y liberación de Nitrógeno y materia orgánica en hojas de *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit, *Guazuma ulmifolia* Lam. y *Moringa oleifera* Lam. en un banco mixto de forraje. *Revistas Chapingo Seria Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 18(1), 5–25. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2011.03.025>
- Qaderi, M. M., y Reid, M. (2009). Crop Responses to Elevated Carbon Dioxide and Temperature. En S. N. Singh (Ed.), *Climate change and crops* (pp. 1–18). Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-88246-6>
- Restrepo-Díaz, H., Melgar, J. C., y Lombardini, L. (2010). Ecophysiology of horticultural crops: an overview. *Agronomía Colombiana*, 28(1), 71–79.
- Reyes, P. (1990). *El maíz y su cultivo*. AGT EDITOR.
- Rivera-Rodríguez, D. M., González, J. D. J., De la Cruz, L., Santacruz-Ruvalcaba, F., y Ruiz, J. A. (2019). Morphological and Climatic Variability of Teosinte (*Zea* spp.) and Relationships among Taxa. *Systematic Botany*, 44(1), 41–51. <https://doi.org/10.1600/036364419X697886>
- Rosado, A., y Serrano, B. (2021). *Los herederos del maíz*. Gobierno de México, Instituto Nacional de los Pueblos Indígenas.
- Sage, R. F., y Kubien, D. S. (2007). The temperature response of C3 and C4 photosynthesis. *Plant, Cell and Environment*, 30(9), 1086–1106. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2007.01682.x>
- Sage, R. F., y Pearcy, R.W. (1987). The Nitrogen Use Efficiency of C₃ and C₄ Plants I. Leaf nitrogen, growth and biomass partitioning in *Chenopodium album* (L.) and *Ama-*

- ranthus retroflexus* (L.). *Plant Physiology*, 84, 954–958. <https://doi.org/https://doi.org/10.1104%2Fpp.84.3.954>
- Sage, R. F., y Stata, M. (2015). Photosynthetic diversity meets biodiversity: The C₄ plant example. *Journal of Plant Physiology*, 172, 104–119. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2014.07.024>
- Sánchez, J. J., y Ruiz, J. A. (1996). Distribución del teocintle en México. En J. A. Serratos, M. C. Willcox y F. Castillo (Eds.), *Flujo Genético entre maíz criollo, maíz mejorado y teocintle: Implicaciones para el maíz transgénico*. CIMMYT.
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2017). *Planeación agrícola nacional. Maíz grano blanco y amarillo Mexicano*. SAGARPA. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/256429/B_sico-Ma_z_Grano_Blanco_y_Amarillo.pdf
- (2020). *Productores de pequeña escala son los que nos dan de comer*. SAGARPA. <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/productores-de-pequena-escala-son-los-que-nos-dan-de-comer/>
- Servicio Meteorológico Nacional. (2024). *Reporte anual del clima en México 2023*. www.conagua.gob.mx
- Siebert, S., Webber, H., y Rezaei, E. (2017). Weather impacts on crop yields - searching for simple answers to a complex problem. *Environmental Research Letters*, 12, 1–3. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa7f15>
- Singh, S. N. (2009). *Climate change and crops*. Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-88246-6>
- Sunkar, R. (2010). Plant Stress Tolerance. In *Methods in molecular biology* (vol. 639). Humana Press. <https://doi.org/10.1007/978-1-60761-702-0>
- Tuxill, J., y Nabhan, G. (2001). *Plantas, comunidades y áreas protegidas. Una guía para el manejo in situ*. Nordan.
- Wahid, A., Gelani, S., Ashraf, M., y Foolad, M. R. (2007). Heat tolerance in plants: An overview. *Environmental and Experimental Botany*, 61(3) 199–223. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2007.05.011>
- Wang, N., Fu, F., Wang, H., Wang, P., He, S., Shao, H., Ni, Z., y Zhang, X. (2021). Effects of irrigation and nitrogen on chlorophyll content, dry matter and nitrogen accumulation in sugar beet (*Beta vulgaris* L.). *Scientific Reports*, 11. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-95792-z>
- Wasilewska-Dębowska, W., Zienkiewicz, M., y Drozak, A. (2022). How Light Reactions of Photosynthesis in C₄ Plants Are Optimized and Protected under High Light Conditions. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(7). <https://doi.org/10.3390/ijms23073626>
- Wilkes, H. G. (2004). Corn, strange and marvelous: But is a definitive origin known? En C. W. Smith, J. Betran y E. C. A. Reinge (Eds.), *Corn: Origin, History, Technology, and Production* (pp. 3–63). John Wiley & Sons, Inc.
- Xiu-Canché, P. A., Cach-Pérez, M. J., Álvarez-Solís, J. D., Mendoza-Vega, J., y Pat-Fernández J. M. (2025). Effect of woody species foliage as soil cover in an alley cropping agroforestry system on microclimate and physiological performance of maize. *Agroforestry Systems*, 99, 247. <https://doi.org/10.1007/s10457-025-01353-y>

- Xiu-Canché, P. A., Cach-Pérez, M. J., Álvarez-Solís, J. D., Mendoza-Vega, J., y Pat-Fernández, J. M. (2023). Maize weed control in tropical alley-cropping systems using foliage of different tree species as soil cover. *Agroforestry Systems*, 97(8), 1587–1599. <https://doi.org/10.1007/s10457-023-00880-w>
- Zizumbo, D., y Colunga, P. (2008). El origen de la agricultura, la domesticación de plantas y el establecimiento de corredores biológico-culturales en Mesoamérica. *Revista de Geografía Agrícola*, 41, 85–113. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=75711472007>
- Zizumbo-Villarreal, D., Colunga-García Marín, P., y Flores-Silva, A. (2016). Pre-Columbian Food System in West Mesoamerica. En R. Lira, A. Casas y J. Blancas (Eds.), *Ethnobotany of Mexico. Interactions of People and Plants in Mesoamerica* (pp. 67–82). Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6669-7_4
- Zizumbo-Villarreal, D., Flores-Silva, A., y Colunga-García Marín, P. (2012). The Archaic Diet in Mesoamerica: Incentive for Milpa Development and Species Domestication. *Economic Botany*, 66(4), 328–343. <https://doi.org/10.1007/s12231-012-9212-5>
- Zizumbo, D., y Colunga-GarcíaMarín, P. (2017). La milpa del occidente de Mesoamérica: profundidad histórica, dinámica evolutiva y rutas de dispersión a Suramérica. *Revista de Geografía Agrícola*, 58, 33-46. <https://doi.org/10.5154/r.ga.2017.58.001>
- Zohary, D., y Hopf, M. (1993). *Domestication of Plants in the Old World* (2ª ed.). Oxford University Press

