






Firmeza, sólidos solubles totales y potencial osmótico de hojas de siete especies de maguey con riego y sin riego

García-Nava, Francisca¹; Peña-Valdivia, Cecilia Beatriz^{1*}; Trejo, Carlos¹
García-Nava, Rodolfo¹; Ramírez Tobías, Hugo²

¹ Programa de Posgrado en Botánica, Colegio de Postgraduados, Montecillo, Estado de México. 56264. México.

² Facultad de Agronomía. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, México. LGAC-CP: Cambio Climático, Estrés en Plantas y Mitigación.

* Autora para correspondencia: cecilia@colpos.mx

Problema

El género *Agave* se distribuye en el sur de Estados Unidos, México, América Central, el Caribe y América del Sur. México es considerado su centro de origen y diversidad debido a que cuenta con 272 de las 310 especies reconocidas, de las que 135 son endémicas. Las plantas de *Agave* están presentes en casi todos los estados de la República Mexicana, excepto Tabasco y Quintana Roo; aunque, algunas regiones y estados tienen más abundancia. El cultivo de maguey fue superado sólo por el de maíz en la agricultura mesoamericana. Los magueyes han sido utilizados desde la antigüedad para satisfacer y complementar necesidades básicas como alimento, forraje, medicamento, construcción y ornamentales, entre otros usos. Actualmente, continúa su uso para fines diversos, entre los que destacan la elaboración de fibras (extraídas principalmente de las hojas) y cerca de 10 especies de *Agave* son cultivadas para la elaboración de bebidas destiladas y fermentadas las cuales han adquirido importancia internacional (derivadas principalmente del tallo) de la que México es líder. Para esto último destacan *Agave cupreata*, *A. lechuguilla*, *A. salmiana*, *A. sisalana* y *A. tequilana*.

Las plantas de maguey prosperan principalmente en los ambientes de las zonas áridas y semiáridas, sitios donde las precipitaciones pluviales son menores a los 300 mm (Ramírez-Tobías *et al.*, 2014). Las características fisiológicas y morfológicas de los magueyes les confieren capacidad notable de adaptación a los ambientes áridos, con disponibilidad limitada de humedad durante periodos prolongados hasta de un año y fluctuaciones amplias de temperatura entre el día y la noche; en esos ambientes se desarrollan y multiplican

Cómo citar: García-Nava, F., Peña-Valdivia, C. B., Trejo, C., García-Nava, R., Ramírez Tobías, H. (2024). Firmeza, sólidos solubles totales y potencial osmótico de hojas de siete especies de maguey con riego y sin riego. *Agro-Divulgación*, 4(6). <https://doi.org/10.54767/ad.v4i6.423>

Editores académicos: Dra. Ma. de Lourdes C. Arévalo Galarza y Dr. Jorge Cadena Iñiguez.

Publicado en línea: Diciembre 2024.

Agro-Divulgación, 4(6). Noviembre-Diciembre. 2024. pp: 39-47.

Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Attribution-Non-Commercial 4.0 International



fácilmente y su productividad es mayor que la mayoría de las plantas que se cultivan en estas zonas. Por su morfología (hojas suculentas modificadas y con cutícula gruesa) y tipo de metabolismo fotosintético estas plantas limitan la pérdida de agua, por transpiración, y la acumulan en tejidos especializados de sus hojas; además, su sistema superficial de raíces les permite utilizar rápidamente el agua de lluvias breves o intermitentes. La firmeza es un atributo de la textura de los tejidos, está relacionada con la estructura de los tejidos, el contenido de agua, la turgencia de las células, la composición de la pared celular y el grosor y composición de la cutícula, que es variable entre las especies vegetales, tejidos, edad o estado de desarrollo de la planta. El grosor de la cutícula, junto con otros atributos morfológicos, es adecuado para identificar y reconocer un gradiente de domesticación del género *Agave* (Lallana *et al.*, 2006).

El estrés hídrico es una condición que, por pérdidas excesivas de agua o inadecuada absorción, conduce a un desbalance hídrico suficiente para reducir la turgencia, disminuir la elongación celular y alterar negativamente los procesos fisiológicos esenciales en las plantas, y es dependiente de la especie y su nivel de tolerancia. Para evaluar estas reacciones en las plantas, frecuentemente se determina el potencial de agua (Ψ_A), el potencial osmótico (Ψ_s) y la acumulación de algunos solutos o el contenido total de ellos (sólidos solubles totales, SST) como indicadores de la tolerancia a la sequía.

La naturaleza e intensidad de las respuestas de las especies de *Agave* a condiciones ambientales extremas, como la restricción de humedad en el suelo, pueden variar considerablemente dependiendo de la edad de la planta, estación del año y hora del día. Por la importancia económica y social que tienen los magueyes en México, y por el interés científico y tecnológico por estas plantas es fundamental generar información sobre sus características biofísicas y fisiológicas para desarrollar alternativas que propicien su aprovechamiento integral.

El gran acervo de magueyes mexicanos podrá aprovecharse después de evaluar y conocer los procesos fisiológicos que le permiten sobrevivir y prosperar en los ambientes extremos descritos, ya que la información sobre el tema es incipiente.

Solución planteada

En hojas de plantas de siete especies de *Agave* de dos años de edad, cultivadas en invernadero con riego y estrés (suspensión de riego durante 20 meses) se evaluó la firmeza, el contenido de SST, y Ψ_s de tejido total, el parénquima y el clorénquima.

Las siete especies de maguey evaluadas fueron: *A. lechuguilla*, y *A. striata* del subgénero *Littaea* y *A. americana*, *A. angustifolia*, *A. asperrima*, *A. cupreata*, *A. salmiana* del subgénero *Agave*. Todas tienen importancia comercial y cultural ancestral y actual, pues, destacan por su uso para producir bebidas destiladas y fermentadas, para obtener fibras, alimentos y forraje (Ramírez-Tobías *et al.*, 2014).

Las plantas fueron obtenidas de semillas y cultivadas en invernadero en el Colegio de Postgraduados, Montecillo, México (clima BS1kw(w), con lluvias en verano e inviernos fríos), en macetas con 12 kg de una mezcla de suelo agrícola y grava de tezontle en proporción 3 a 1. Desde la siembra, hasta la emergencia de la segunda hoja las plantas fueron regadas una vez por semana, con agua suficiente para conservar el sustrato húmedo. Luego

se formaron dos grupos de plantas a uno se le proporcionó 1 litro de agua cada semana y al otro se le suspendió el riego durante 20 meses (humedad del suelo 30 y 3% respectivamente). El potencial de agua (Ψ_A) se midió en el sustrato en cámaras psicrométricas (Wescor C-52, Inc, Utha, EE.UU.) conectadas a un microvoltímetro (Wescor HR-33T, Inc, Utha, EE.UU.), operado en el modo de punto de rocío. El Ψ_A fue -0.7 ± 0.07 y -5 ± 0.41 e.e. MPa en los tratamientos con riego frecuente y con riego suspendido.

VARIABLES EVALUADAS

Las variables evaluadas en las hojas fueron firmeza, contenido de SST y potencial osmótico (Ψ_s) del tejido total, y del parénquima y el clorénquima, los dos tejidos de la hoja. La firmeza se determinó en la base, el centro y el ápice de la hoja (tres mediciones por sección) con un texturómetro-universal (Sommer and Runge KG, modelo Sur Berlín, Berlín-Friedenau). Este mide la distancia de penetración de un puntal cónico con 117.33 g de peso, 1.2 mm de diámetro y con caída libre por un intervalo de 4 s hasta la superior del tejido. Los resultados se expresan como: distancia de penetración del puntal en mm. Los sólidos solubles totales (SST) expresados como °Bx están constituidos por azúcares (80-95%) disueltos dentro de la célula (savia), su concentración en la planta depende directamente de la fotosíntesis en las hojas y de los factores climáticos del sitio de crecimiento principalmente. El contenido de SST fue evaluado en tres muestras de la base, centro y ápice de las hojas. Las muestras se obtuvieron con un sacabocados de 1.5 cm de diámetro, cada una fue envuelta en hoja de aluminio y fueron congeladas (-4 °C por 24 h), posteriormente se introdujeron en una jeringa hipodérmica, se permitió su descongelación y el émbolo se presionó para obtener la savia a 25 ± 2 °C. Una alícuota de savia (0.3 mL aproximadamente) se colocó sobre el sensor de un refractómetro digital (Atago PAL⁻¹) y se obtuvo la lectura. El Ψ_s , junto con otras características de la planta, permite explicar cómo responde la planta el déficit de humedad, sus valores en la planta son menores a cero y negativos y sus unidades son los megapascuales (MPa). El Ψ_s del tejido total, del parénquima y del clorénquima fue evaluado en cinco secciones entre la base y el ápice de la hoja, extraídas con un sacabocados de 1 cm de diámetro. El clorénquima, tejido exterior (mesófilo de la hoja) debajo de la epidermis con las células con cloroplastos, fue separado manualmente del parénquima, con ayuda de un bisturí. Las muestras fueron empaquetadas en hoja de aluminio y congeladas (a -4 °C por 24 h). Posteriormente fueron introducidas en jeringas hipodérmicas, se dejaron descongelar a 25 ± 2 °C y 10 μ L del extracto celular se recolectaron con una micropipeta (Biopette autoclavable), fueron colocados sobre un disco de papel filtro de 6 mm de diámetro y el Ψ_s fue cuantificado en un osmómetro de presión de vapor (Wescor 5520, EE.UU.).

El diseño experimental fue completamente al azar con nueve repeticiones. La unidad experimental estuvo representada por una maceta (con tres plantas) y fueron evaluados 14 tratamientos (siete especies de magueyes y dos condiciones de humedad del suelo). Los datos fueron analizados con ANDEVA y comparaciones múltiples de medias, con la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$).

Variabilidad en la firmeza. La firmeza de la hoja mostró diferencias ($P \leq 0.05$) entre los subgéneros, las especies y las condiciones de riego; además, mostró un gradiente entre

las especies, en ambas condiciones de humedad, independiente del subgénero. Con riego *A. striata* tuvo la firmeza mayor (0.049 mm) y *A. aspérrima* y *A. cupreata* los valores menores (0.188 mm en promedio). Con la falta de riego la tendencia fue parcialmente similar, ya que *A. striata* y *A. aspérrima* mantuvieron el valor menor (0.068 mm) y mayor (0.249 mm) respectivamente. La firmeza disminuyó con la falta de riego, desde 9% en *A. cupreata* hasta 35% en *A. angustifolia* (Figura 1).

La cutícula afecta la firmeza y resistencia a la rotura del tejido, su grosor y composición son características que le confieren parte de esa resistencia. Los resultados mostraron indirectamente que el grosor de la cutícula de las hojas de maguey parece disminuir y su composición y ultraestructura parece cambiar con la restricción de humedad y no es similar entre las especies. Una de las funciones de la cutícula es actuar como barrera que reduce la pérdida de agua y difusión de gases. La cutícula es viscoelástica y solidifica la pared celular de la epidermis. La rigidez de la cutícula es atribuible a los polisacáridos (moléculas hidrocarbonadas de peso molecular alto) y flavonoides. La matriz de la cutina es principalmente responsable de su elasticidad; los flavonoides refuerzan la elástica de los polisacáridos y, junto con las ceras, tienden a reducir la movilidad de la cutina y aumentan la rigidez (Lallana *et al.*, 2006). Los flavonoides son un grupo amplio de metabolitos secundarios. Una de las funciones de los flavonoides en las plantas es filtrar los rayos ultravioleta, protegiéndolas de este factor de estrés; además, los flavonoides tienen funciones de reguladores del ciclo celular. La firmeza foliar menor de las plantas sin riego puede deberse a modificaciones de la composición de los tejidos. Las hojas de las plantas de *A. angustifolia*, de ocho años de edad, de tres regiones de Oaxaca, presentaron un contenido de humedad en la hoja de 79, 82 y 83.25% respectivamente, la resistencia de las hojas con menos humedad

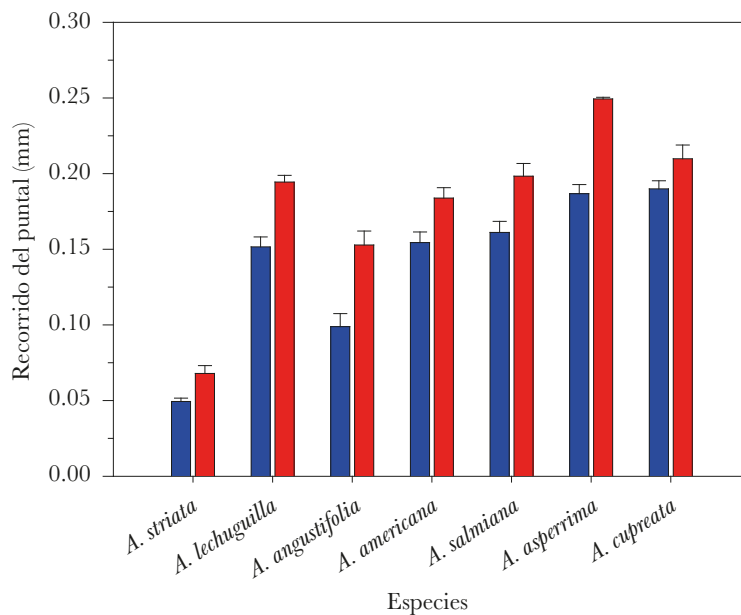


Figura 1. Efecto del riego (barras azules) y su suspensión por 20 meses (barras color rojo) en el recorrido del puntal (penetración del tejido) del texturómetro (+e) en hojas de *Agave* spp. (n=9).

presentó menor rigidez en la cutícula, debido a que la celulosa se deshidrató y cristalizó, las hemicelulosas presentaron rigidez menor.

En contraste, a mayor humedad, los polisacáridos se hidratan, se hinchan y engrosan el tejido, la viscosidad de la cutícula aumenta, su apariencia macroscópica se modifica y la firmeza de la hoja aumenta. Además de la humedad, la madurez y el contenido de fibra afectan las características mecánicas de los tejidos vegetales (Lallana *et al.*, 2006). La textura está relacionada con la composición química y estructura de las paredes celulares del parénquima. Las microfibrillas cristalinas de celulosa, que constituyen 35% del residuo seco, las hemicelulosas, pectinas y lignina son responsables de la firmeza del vegetal; las fibrillas están en las paredes celulares de los tejidos encargados del soporte y la protección. Además, la turgencia que es característica responsable de la firmeza y succulencia de los vegetales, depende del agua que puede constituir hasta 96% del peso del tejido.

Variabilidad en sólidos solubles totales. El contenido de SST en la hoja varió ($P \leq 0.05$) ampliamente entre y dentro de los subgéneros, en ambas condiciones de humedad. Con el riego *A. striata* acumuló 25% más SST que *A. lechuguilla*; en contraste, sin riego la última acumuló 31% más SST que *A. striata*, pero ambas incrementaron significativamente el contenido de SST. En este caso sobresalió *A. lechuguilla* porque duplicó el valor. En el resto de las especies el contenido de SST fue significativamente menor con riego que sin él, con excepción de *A. cupreata*. La disminución de humedad incrementó 24% en *A. americana* hasta 73 y 81% en *A. asperima* y *A. angustifolia*. El incremento en *A. salmiana* representó más del doble (Figura 2).

Los SST representan la concentración de azúcares y otras moléculas, como ácidos orgánicos, aminoácidos y péptidos, solubilizadas en la savia de los tejidos vegetales; pero los azúcares son generalmente los más abundantes. Las diferencias en el contenido de SST

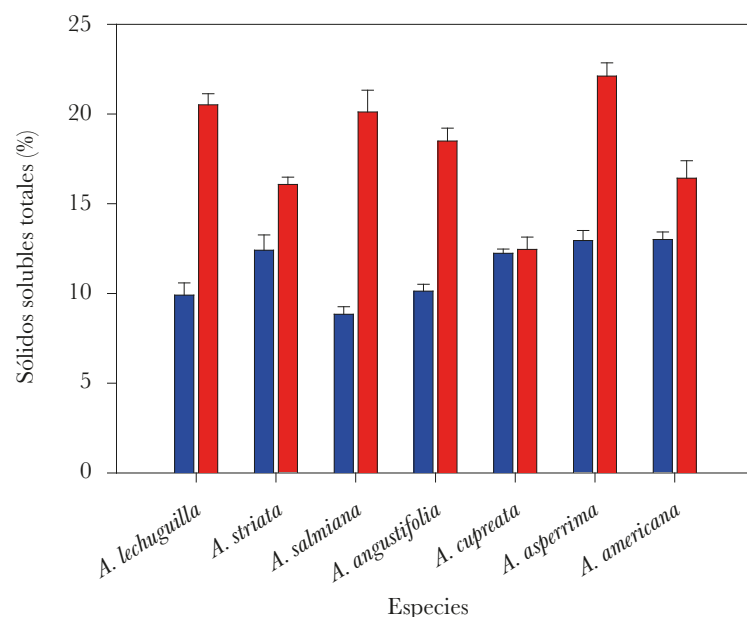


Figura 2. Efecto del riego (barras color azul) y su suspensión por 20 meses (barras color rojo) en el contenido de sólidos solubles totales (+e.e) de las hojas de *Agave* spp. ($n=27$, $P \leq 0.05$).

entre las especies, además del estrés hídrico, pueden ser efecto de la especie. La composición química y el perfil de carbohidratos de las hojas de las plantas jóvenes de maguey pueden ser materia prima para obtener jarabe de fructosa, fructosa cristalina, edulcorantes (fructoligosacaridos e inulina) y etanol, ácido cítrico, sorbitol o ácido glucónico (Martínez *et al.*, 2012).

Está documentado que la acumulación de SST en hojas de maguey en épocas secas se debe al efecto de la concentración de compuestos como los azúcares; además, la temperatura también modifica directamente la succulencia y riqueza de reservas de la planta. Estos cambios en los vegetales además de relacionarse con el incremento de la concentración de solutos por efecto de la deshidratación celular también resultan de la acumulación celular activa de ellos, reduciendo el potencial osmótico y por lo tanto permiten mantener el potencial de turgencia positivo en los tejidos. La acumulación de solutos ha sido asociada con el mantenimiento de la integridad y funcionalidad de las membranas celulares, estructuras de las proteínas y disminución de los daños oxidativos. La acumulación de solutos en la raíz de las plantas durante el ajuste osmótico se correlaciona con la tolerancia al estrés por déficit de humedad en numerosas especies.

Variabilidad en el potencial osmótico (Ψ_s) del tejido foliar. En el subgénero *Littaea*, el Ψ_s fue menor ($P \leq 0.05$) en *A. lechuguilla* respecto a *A. striata* en ambas condiciones de humedad y en ellas disminuyó ($P \leq 0.05$) 21 y 36% por la falta de riego. En el subgénero *Agave*, el Ψ_s no fue diferente ($P > 0.05$) entre las especies con riego; con la suspensión del riego el Ψ_s disminuyó en las cinco especies, desde -1.07 hasta -1.42 MPa en *A. americana* y *A. salmiana*. La disminución no fue proporcional al valor con riego y las diferencias mayores del Ψ_s se detectaron con la suspensión del riego entre las siete especies (Figura 3).

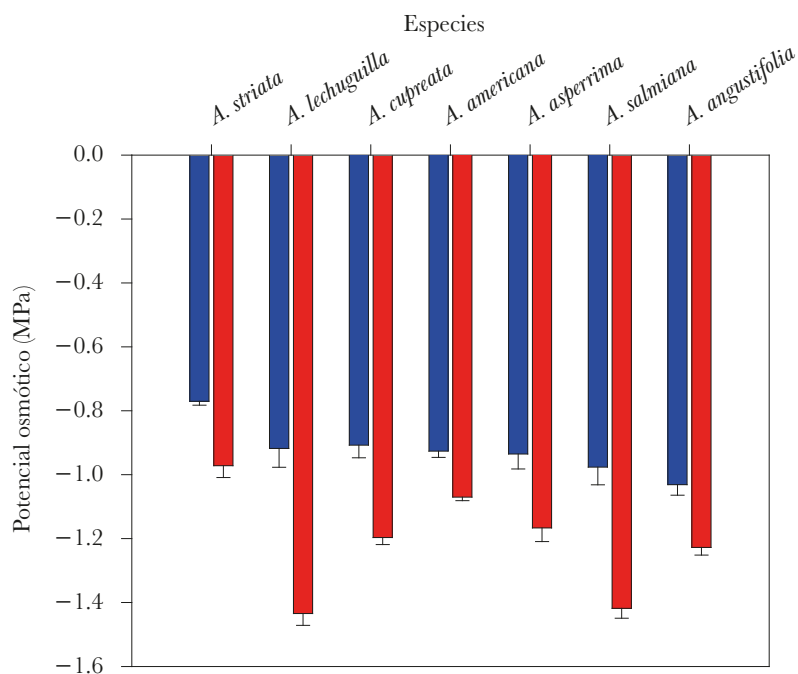


Figura 3. Efecto del riego (barras color azul) y su suspensión por 20 meses (barras color rojo) en el potencial osmótico foliar ($-e.e$) de *Agave* spp. ($n=15$, $P \leq 0.05$).

La disminución de la humedad del suelo generalmente incrementa la concentración de solutos celulares en las plantas; esto permite mantener la absorción del agua y la presión de la turgencia celular, lo que está relacionado con el decremento del Ψ_s de las células. Al respecto, la acumulación de solutos es un mecanismo fisiológico que permite la disminución del daño celular y la deshidratación de las células. La intensidad de esta respuesta puede ser una adaptación de las plantas, como los magueyes, ya que contribuye a su resistencia a las sequías y desecación extrema, minimiza la foto-inhibición y mantiene a la planta en un estado metabólicamente activo en esos períodos y podría incrementar su tolerancia y tasa de supervivencia.

Además de la disminución del número de estomas, el área y de la acumulación de biomasa foliar e incremento de la asignación de biomasa a la raíz, grosor de las hojas, características que favorecen su éxito de las plantas de *Agave* en ambientes áridos y semiáridos durante periodos prolongados de sequía, ahora pueden incluirse el incremento de SST y del Ψ_s osmótico de la hoja.

Variabilidad en el potencial osmótico del parénquima. Debido al contraste en el Ψ_s de las hojas entre las especies de *Agave* y a las funciones contrastantes del parénquima (responsable de almacenar agua) y el clorénquima (responsable de la fotosíntesis), el Ψ_s de estos dos tejidos separados fue evaluado. Los resultados permitirán conocer si esos tejidos amortiguan igualmente la restricción de humedad entre las especies de *Agave*. El Ψ_s del parénquima mayor y menor entre las seis especies, con riego, correspondió a *A. lechuguilla* (-0.89 MPa) y *A. americana* (-1.2 MPa) respectivamente. La restricción de humedad disminuyó ($P \leq 0.05$) el Ψ_s del parénquima de las seis especies, entre -1.3 MPa en *A. cupreata* y -2 MPa en *A. salmiana*. Las diferencias menores y mayores del Ψ_s en este tejido, entre riego y déficit de humedad las presentaron *A. cupreata* y *A. angustifolia* y *A. salmiana* respectivamente (Figura 4). Estas diferencias son parte de los ajustes fisiológicos que le permiten al parénquima mantener las relaciones hídricas adecuadas, en el mismo y los demás tejidos, durante la sequía. El ajuste del Ψ_s también permite el mantenimiento de la turgencia de las células y evitan su plasmólisis.

Variabilidad en el potencial osmótico de clorénquima. El Ψ_s del clorénquima de los subgéneros en el suelo hidratado fluctuó entre -1.64 y -0.96 MPa en *A. americana* y *A. angustifolia*. El cambio menor y mayor por efecto del déficit de humedad se observó en *A. asperrima* y *A. angustifolia*, respectivamente (Figura 5). Las hojas de maguey, como otras suculentas, presentan un tejido externo fotosintéticamente activo, llamado clorénquima, en el que se llevan a cabo los aspectos típicos de las plantas con metabolismo ácido crasuláceo (MAC). Una característica adaptativa de las plantas de maguey, como en nopal, es que prolongan la actividad fisiológica durante la sequía mediante el almacenamiento de agua en el parénquima; esta característica es identificada como succulencia de las hojas.

El agua del parénquima que parece perderse durante la sequía es enviada al tejido fotosintético (clorénquima, responsable de la fijación de carbono y la actividad fotosintética); esto lo mantiene hidratado durante períodos largos de sequía y permite continuar creciendo a las plantas por varios meses en condiciones de estrés hídrico. Sin embargo, el potencial osmótico del clorénquima entre las especies de *Agave* fue significativamente menor con restricción de humedad en parénquima, con -2.0 MPa en *A. salmiana* y -1.4 MPa en *A.*

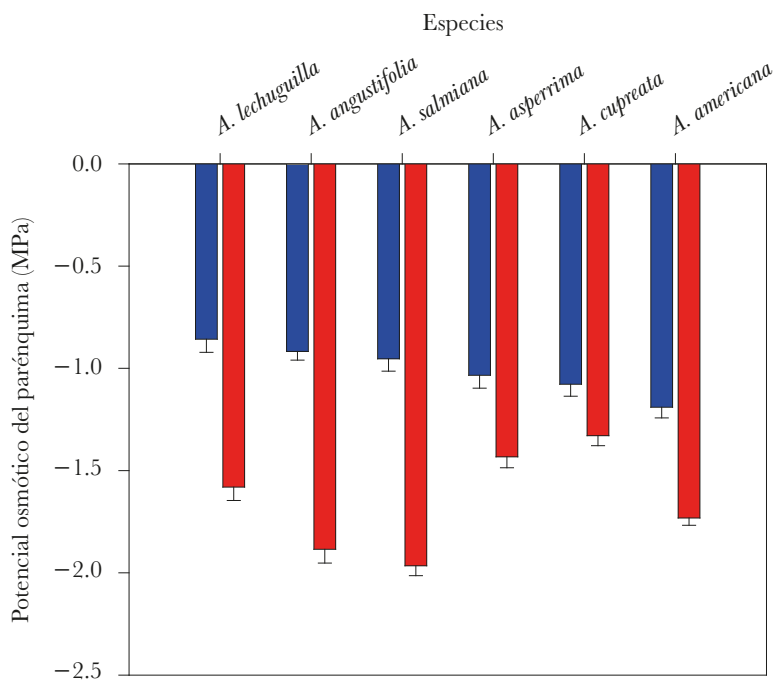


Figura 4. Efecto del riego (barras color azul) y su suspensión por 20 meses (barras color rojo) en el potencial osmótico (-e.e) del parénquima de hojas de *Agave* spp. (n=15, $P \leq 0.05$).

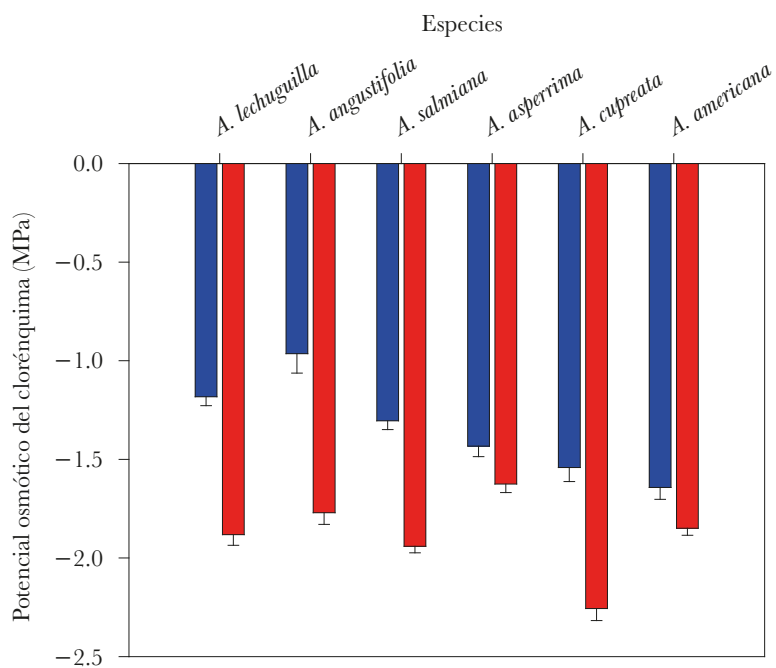


Figura 5. Efecto del riego (barras color azul) y su suspensión por 20 meses (barras color rojo) en el potencial osmótico (-e.e) del clorénquima de las hojas de *Agave* spp. (n=15, $P \leq 0.05$).

cupreata, respecto al clorénquima, con -2.4 MPa en *A. cupreata* y -2.0 MPa *A. salmiana*. Las diferencias están relacionadas con las funciones biofísicas, fisiológicas y bioquímicas de cada tejido.

La deficiencia de la humedad en el suelo promovió el incremento tanto de la firmeza de la hoja, como del contenido de sólidos solubles totales y la disminución del potencial osmótico de las hojas. Los cambios de las características biofísico-fisiológicas de las hojas de *Agave* son parcialmente dependientes de la humedad del suelo y de la especie y son características adecuadas para evaluar la tolerancia de las plantas al estrés por sequía. Además, dependiendo de la utilidad por el uso que se le vaya a dar (construcción, alimento, fibra, etc.) se podrían definir periodos de falta de agua en el cultivo para tener un mayor rendimiento en la utilidad que se desee.

Innovación, impactos e indicadores

Nivel de Innovación	Descripción	Transferido	Impacto		Indicador General de Políticas Públicas	Indicadores Específicos	Subindicador
			Sector	Ámbito			
Incremental	Busca mejorar los sistemas que ya existen haciéndolos mejores, más rápidos.	Asociaciones Académicas y Científicas. Gobierno de los Estados. Productores. Comunidades Agrarias.	Primario: Agricultura, Ganadería, Explotación forestal. Secundario: Procesos de Investigación, Desarrollo e Innovación.	Social. Económico. Ambiental. Conocimiento. Uno, o la combinación de dos o más de las opciones anteriores.	Ciencia y Tecnología. Económico. Educación. Responsabilidad ambiental. Uno o la combinación de dos o más de las opciones anteriores.	Competitividad. Recursos naturales. Comercio. Capacitación. Uno o combinación de dos o más de las opciones anteriores.	Numero de tesis. Número de egresados (Lic. M.C., D.C.). Número de publicaciones. Número de familias beneficiadas. Transferencias tecnológicas. Aplicación de técnicas y conocimientos tecnológicos para el desarrollo social y económico.

