





# Permeabilidad de las membranas celulares de hojas de maguey (*Agave* spp.) y su relación con la especie y humedad del suelo

Francisca García-Nava<sup>1</sup>; Cecilia Beatriz Peña-Valdivia<sup>1\*</sup>; Carlos Trejo<sup>1</sup>  
Rodolfo García-Nava<sup>1</sup>; Hugo Ramírez Tobías<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Programa de Posgrado en Botánica, Colegio de Postgraduados, Montecillo, Estado de México. 56264. México.

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

\* Autor para correspondencia: cecilia@colpos.mx

## Problema

El agua es un factor limitante para el crecimiento de las plantas en la tierra y actúa como una fuerza selectiva de primer nivel para la evolución y distribución de las especies vegetales. Actualmente la falta de agua es una de las mayores limitantes en la producción y expansión de las áreas agrícolas, debido a los cambios ambientales globales y el incremento de la aridez de muchas regiones del planeta. Por consiguiente, es relevante conocer el efecto de la deficiencia de humedad en los suelos sobre la morfología, fisiología y metabolismo de las plantas. Las plantas difieren en su respuesta al estrés causado por el ambiente. La naturaleza e intensidad de la respuesta puede variar considerablemente dependiendo de la edad de la planta o del tejido, la estación del año, la intensidad y duración del evento generador del estrés en la planta. La tolerancia al déficit de humedad depende de los mecanismos de adaptación de las plantas; pero las respuestas varían entre y dentro de ellas. Entre los ajustes que la planta hace para tolerar el estrés están los relacionados con la estabilidad de las membranas celulares.

Las membranas celulares son las estructuras reconocidas como sitios sensores de diferentes factores abióticos que generan estrés en las plantas, como el exceso de sales, la deficiencia de humedad, la contaminación del aire, las temperaturas altas y bajas, la acidez del suelo, la presencia de metales pesados. La pérdida de la integridad de las membranas, causada por fluidez excesiva o peroxidación lipídica puede incrementar la permeabilidad de la membrana y la muerte celular durante el estrés. El incremento descontrolado de la permeabilidad de las membranas incrementa la liberación de solutos, como iones, azúcares solubles y aminoácidos, la que está correlacionada positivamente con la severidad del daño en las membranas producido por el estrés. La cuantificación de la conductividad

**Cómo citar:** García-Nava, F., Peña-Valdivia, C.B., Trejo, C., García-Nava, R., Ramírez-Tobías, H. (2024). Permeabilidad de las membranas celulares de hojas de maguey (*Agave* spp.) y su relación con la especie y humedad del suelo. *Agro-Divulgación*, 4(6). <https://doi.org/10.54767/ad.v4i6.430>

**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: 81-87.

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



eléctrica, basada en la medición de la cantidad de electrolitos liberados en el medio de re suspensión del tejido es utilizada para evaluar la integridad y funcionalidad de las membranas celulares (Kovaleski y Grossman, 2021).

El género *Agave* se encuentra distribuido y bien adaptado a regiones áridas y semiáridas por sus características morfológicas y fisiológicas. Varias de las especies del género *Agave* son el producto de la domesticación y se han cultivado con propósitos diversos, como la producción de bebidas alcohólicas destiladas (bacanora, mezcal, raicilla, sotol y tequila), la extracción de fibras, su uso en la medicina tradicional, entre otros. Las plantas de *Agave* son perennes, suculentas, con raíces duras fibrosas y tallos gruesos muy cortos, presentan el metabolismo fotosintético de tipo ácido crasuláceo (MAC) y se caracterizan por su eficiencia alta en el uso del agua; estos mecanismos les permiten sobrevivir en condiciones de déficit hídrico constante. Debido a que aún se conocen sólo parcialmente los procesos biofísicos y fisiológicos que las plantas realizan para enfrentar exitosamente el estrés producido por los ambientes áridos y semiáridos, existe interés por la investigación de estas plantas para desarrollar modelos que permitan conocer los mecanismos que le confieren resistencia al déficit de humedad prolongado.

### Solución planteada

El efecto del riego y la suspensión durante 20 meses fue evaluado en la permeabilidad de las membranas celulares de las hojas de plantas de siete especies de *Agave* de dos años de edad, cultivadas en invernadero.

### Material vegetal evaluado

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 L 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 ( $\Psi_A$ ) 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  $\Psi_A$  fue  $-0.7 \pm 0.07$  y  $-5 \pm 0.41$  e.e. MPa en los tratamientos con riego frecuente y con riego suspendido.

### Variables evaluadas

Determinación de la permeabilidad de las membranas celulares. La permeabilidad de las membranas celulares fue cuantificada mediante la conductividad eléctrica (en  $\mu\text{S}$

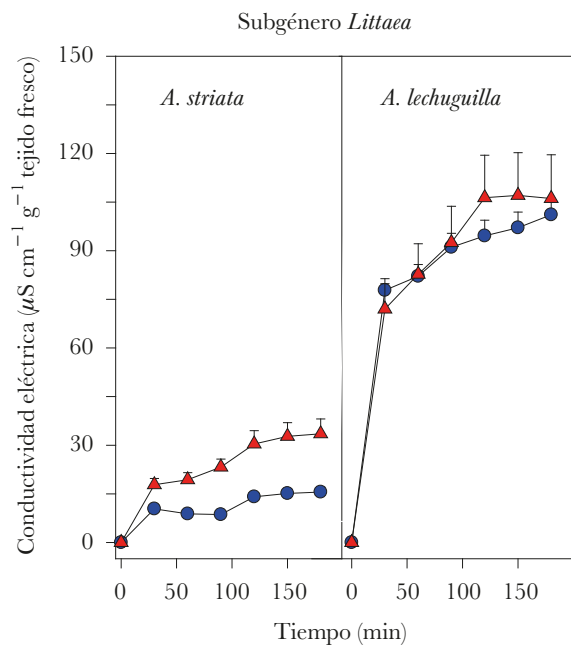
$\text{cm}^{-1} \text{g}^{-1}$  tejido fresco) del medio acuoso en el que se suspendieron segmentos frescos o congelados de las hojas. Para esto, se obtuvieron con un sacabocados, cinco segmentos de 1.5 cm de diámetro de la base al ápice de las hojas y los resultados fueron el promedio de los segmentos de cada hoja. El peso de las muestras se obtuvo en una balanza analítica (Scientech, EE.UU., precisión de 0.0001 g), se colocaron individualmente en cajas Petri con 25 mL de agua desionizada, que se mantuvieron con agitación ligera y constante en un agitador orbital (VSOS-4P Lab Plus Series PRO), a  $25 \pm 2$  °C. Las lecturas de la conductividad eléctrica se obtuvieron con un conductímetro (Horiba B-173, Kyoto Japón), cada 30 min durante 3 h, en 100  $\mu\text{L}$  del medio y los valores fueron ajustados a 1 g de tejido. Otro grupo de muestras se congeló y la conductividad eléctrica, de los electrolitos liberados, se midió igual que en las muestras frescas. La permeabilidad relativa de las membranas celulares en porcentaje, fue estimada con los cambios de la conductividad eléctrica (C.E.) generada por los segmentos de tejido fresco y por el tejido muerto por congelación (Cm), con la siguiente igualdad (Kovaleski y Grossman, 2021):

$$\text{Permeabilidad relativa de las membranas celulares (\%)} = (C.E. / Cm) \times 100$$

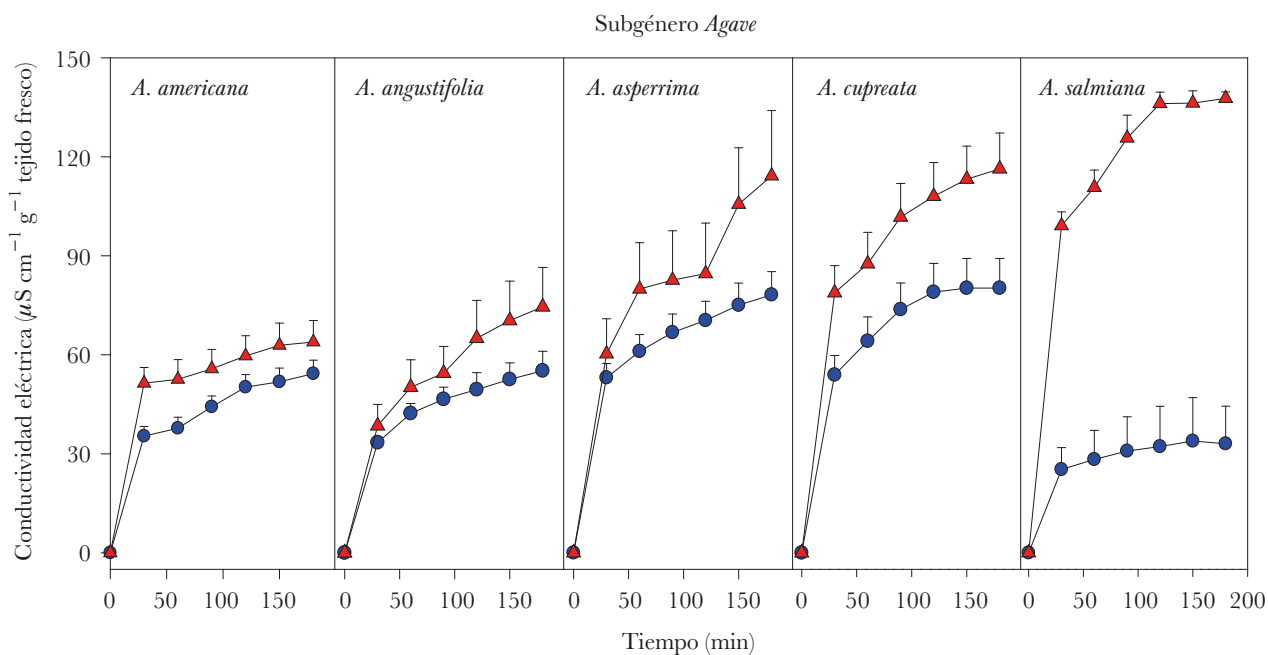
**Diseño experimental y análisis estadístico.** El diseño experimental fue completamente al azar con nueve repeticiones. La unidad experimental estuvo representada por una maceta (con tres plantas). Catorce tratamientos fueron evaluados, resultantes de la combinación de las siete especies de *Agave* y dos condiciones de humedad del suelo de (3 y 30% de humedad, sin riego y con riego). Análisis de varianza fue aplicado a los datos y comparaciones múltiples de medias con la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ). El análisis se realizó con el paquete estadístico SAS V9; la representación se realizó con el programa Sigma Plot de Jandel Scientific (Versión 11.0).

**Permeabilidad de las membranas celulares.** Varias características generales de la cinética de liberación de electrolitos, evaluada mediante la conductividad eléctrica del medio acuoso en que se mantuvo el tejido foliar coincidieron entre las siete especies evaluadas. La conductividad eléctrica generada por el tejido fresco incrementó con el tiempo de permanencia en el medio acuoso de las siete especies; sin embargo, la tasa de liberación fue diferente entre ellas; con excepción de *A. lechuguilla*, los tejidos de las plantas sin riego generaron conductividad eléctrica menor comparada con la de las plantas con riego. Todos los tratamientos presentaron, liberación de electrolitos acelerada en los primeros 30 min y caída de la tasa de liberación a partir de ese tiempo. Con excepción de *A. lechuguilla* y *A. salmiana* sin riego, la liberación lenta de electrolitos se mantuvo así hasta los 180 min (Figura 1 y 2). Cambios de la conductividad eléctrica del medio similares a los obtenidos con los tejidos foliares de maguey, con riego y con restricción de humedad, fueron obtenidos con foliolos de plantas de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) domesticado, silvestre y su progenie afectados por estrés por frío y calor, con temperaturas entre 5 y 40 °C (Morales-Santos *et al.*, en este número de Agro Divulgación).

Además, se observaron diferencias significativas entre y dentro de los dos subgéneros. Las plantas de *A. striata*, del subgénero *Littaea*, con y sin riego generaron conductividad eléctrica en el medio acuoso seis veces menor respecto a *A. lechuguilla*, durante los 180 min



**Figura 1.** Conductividad eléctrica del medio de acuoso (+e.e.) durante el tiempo de permanencia de segmentos de hojas de plantas de dos años de edad de *Agave* spp., del subgénero *Littaea*, cultivadas en invernadero con riego semanal (●) o sin riego durante dos años (▲) (n=9).



**Figura 2.** Conductividad eléctrica del medio de acuoso (+e.e.) durante el tiempo de permanencia de segmentos de hojas de plantas de dos años de edad de *Agave* spp., del subgénero *Agave*, cultivadas en invernadero con riego semanal (●) o sin riego durante dos años (▲) (n=9).

de la evaluación (tiempo en el que la conductividad eléctrica del medio se había estabilizado o mostraba los cambios menores). En promedio, *A. striata* con suspensión de riego incrementó la conductividad del medio hasta el doble, después de los 180 min, en com-

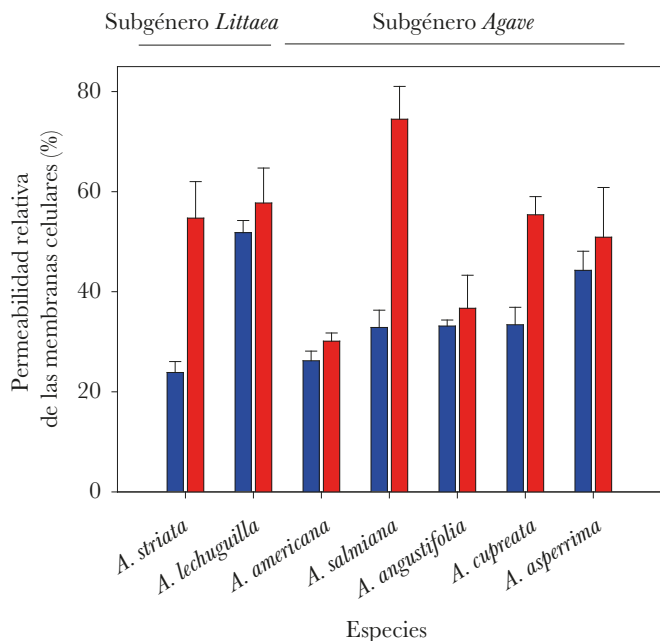
paración con el riego. En contraste, *A. lechuguilla* no modificó la conductividad eléctrica del medio por efecto de la suspensión del riego; además, en esta condición el tejido foliar estabilizó la conductividad desde los 120 min, es decir una hora antes que los otros tratamientos (Figura 1). Estos resultados muestran que las plantas de las dos especies de maguey del subgénero *Littaea* enfrentan la restricción de humedad mediante mecanismos biofísicos parcialmente diferentes en las membranas celulares, o mediante la composición específica de electrolitos o ambos.

Las especies del subgénero *Agave*, como en el subgénero *Littaea*, también mostraron diferencias significativas en la cinética de liberación de electrolitos. Aunque las plantas de las cinco especies del subgénero *Agave* con riego y restricción de humedad incrementaron significativamente la conductividad eléctrica del medio en el tiempo de evaluación, en los tejidos con riego, después de los 180 min la conductividad eléctrica máxima mostró un gradiente con valores entre 30 y 85  $\mu\text{S cm}^{-1} \text{g}^{-1}$  tejido fresco, en el siguiente orden: *A. salmiana* < *A. americana* < *A. angustifolia* < *A. asperrima* < *A. cupreata*. Además, únicamente en *A. cupreata* y *A. salmiana* la conductividad eléctrica máxima del tejido foliar de las plantas con riego se alcanzó antes de los 180 min. En esta última el valor máximo se detectó desde los 30 min y en los siguientes 150 min los cambios no fueron significativos, pero se estabilizó totalmente desde los 90-120 min. En *A. cupreata* la estabilización de la conductividad eléctrica se visualizó a partir de los 120 min. En contraste, en las otras especies de este subgénero el incremento fue significativo después de los 30 min y la salida de electrolitos continuó aumentando o tendió a estabilizarse a partir de los 150 min (Figura 2).

En los tejidos de las plantas sin riego, del subgénero *Agave*, la conductividad eléctrica máxima del medio, después de los 180 min de evaluación, mostró un gradiente entre 65 y 140  $\mu\text{S cm}^{-1} \text{g}^{-1}$  tejido fresco, en el siguiente orden: *A. americana* < *A. angustifolia* < *A. asperrima* < *A. cupreata* < *A. salmiana*. Además, de las especies del subgénero *Agave*, *A. americana* y *A. salmiana* destacaron porque en la primera la conductividad eléctrica máxima fue sólo 8  $\mu\text{S cm}^{-1} \text{g}^{-1}$  tejido fresco mayor que con riego y en la segunda la conductividad máxima del tejido de las plantas, también sin riego fue cerca de 120  $\mu\text{S cm}^{-1} \text{g}^{-1}$  tejido fresco. En el subgénero *Agave* el incremento de la conductividad eléctrica de los tejidos foliares de las plantas sin riego fue menor (entre 60 y 80  $\mu\text{S cm}^{-1} \text{g}^{-1}$  tejido fresco) en *A. americana* y *A. angustifolia*, en comparación con *A. asperrima*, *A. cupreata* y *A. salmiana* (entre 100 y 140  $\mu\text{S cm}^{-1} \text{g}^{-1}$  tejido fresco) en la misma condición de humedad (Figura 2).

La permeabilidad relativa (%) de las membranas es una medida del control de la salida de electrolitos y otras moléculas, desde las regiones subcelulares hasta el medio acuoso que rodea a los tejidos foliares. Este estudio mostró que existen diferencias significativas en la funcionalidad de las membranas celulares de las hojas entre los subgéneros y las especies de maguey; además, las plantas jóvenes de las siete especies responden parcial o totalmente diferente a la restricción prolongada de humedad (Figura 3).

Con riego *A. lechuguilla* presentó la permeabilidad relativa mayor de ambos subgéneros. La diferencia mayor en la permeabilidad relativa en las plantas con riego se observó entre las especies del subgénero *Littaea*; en este caso, *A. striata* mostró la mitad de la permeabilidad relativa de la membrana en comparación con *A. lechuguilla*. Aunque sin riego,



**Figura 3.** Efecto del riego (barras color azul) y su suspensión por 20 meses (barras color rojo) en la permeabilidad relativa de las membranas celulares (+e.e.) de hojas de plantas de *Agave* spp. (n=15).

la permeabilidad relativa de ambas especies del subgénero *Littaea* no mostró diferencia significativa, en *A. striata* ese valor fue más del doble respecto al de las plantas con riego. En contraste, en *A. lechuguilla* la permeabilidad relativa no cambió significativamente con la restricción de humedad (Figura 3). En el subgénero *Agave*, la permeabilidad relativa de las membranas en la condición con riego fue significativamente similar en *A. americana*, *A. salmiana*, *A. angustifolia* y *A. cupreata* y fue menor ( $P \leq 0.05$ ) respecto a *A. asperrima*. Sin embargo, con la suspensión del riego la permeabilidad relativa de las membranas incrementó significativamente *A. salmiana* y *A. cupreata* y en el primer caso el incremento fue más del doble (Figura 3).

La estabilidad de las membranas celulares frecuentemente es utilizada como un criterio para evaluar la tolerancia de las plantas a la sequía, ya que el estrés hídrico causado por la pérdida de agua de los tejidos vegetales afecta su estructura, composición y función. Por esto, la salida de cantidades mayores de electrolitos generalmente incrementa la conductividad eléctrica del medio acuoso en el que se mantiene el tejido de prueba. Sin embargo, esto depende del tipo y cantidad de electrolitos liberados; entre estos pueden estar iones como  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Fe}^{++}$ ,  $\text{PO}_4^-$ , algunos aminoácidos, ácidos orgánicos, entre otros. Los resultados de los tejidos foliares de las plantas con riego indicaron que hay diferencias significativas en la funcionalidad de las membranas entre las especies de *Agave* y su capacidad para regular la salida de electrolitos también podría diferir entre ellas. Los resultados de los tejidos de las plantas con riego y sin riego también pueden indicar que la composición intercelular es diferente entre las especies de *Agave*, y debido a esto el tipo y la concentración de los electrolitos liberados son diferentes entre ellas. Por ejemplo, los  $\Psi_A$  menores que  $-0.03$  MPa, considerados con déficit de humedad, incrementan la liberación de  $\text{K}^+$

en la raíz de frijoles silvestres y domesticados; así, el sustrato con menor  $\Psi_A$  incrementó 2.5 veces la liberación de  $K^+$  en las tres variantes.

Las alteraciones por el estrés hídrico en las membranas celulares pueden estar asociadas a cambios en la estructura física o composición químicas de los lípidos (contenido, composición, saturación y fluidez) y las proteínas dan forma y función a cada membrana en la célula. Al respecto, este estudio mostró que el índice de daño en las membranas celulares es un parámetro adecuado para identificar diferencias y semejanzas entre especies de maguey y que la estabilidad de las membranas celulares en respuesta al déficit de humedad es un carácter relativamente común (cerca de 60%) en el género *Agave*.

Independientemente de la cantidad y tipo de electrolitos liberados al medio, la conductividad eléctrica generada por los tejidos foliares, o alteraciones en las membranas celulares es razonable suponer que las plantas jóvenes de las siete especies de *Agave*, en las condiciones de este estudio, toleraron la humedad restringida en el sustrato ( $\Psi_A < -5$  MPa) durante 20 meses sin riego, y permanecieron vivas, pues después de ese tiempo se reactivó el riego y las plantas continuaron su crecimiento. El efecto parcial de la humedad restringida en el crecimiento de las plantas de las mismas especies evaluadas en este estudio fue documentado por Ramírez-Tobías *et al.* (2014). La disminución relativa de la funcionalidad de las membranas celulares de *A. striata*, *A. cupreata* y *A. salmiana* puede ser evidencia de que estas especies son menos tolerantes a la sequía prolongada en comparación con *A. americana*, *A. lechuguilla*, *A. angustifolia* y *A. asperrima*.

El déficit de humedad prolongado en plantas jóvenes de maguey provoca ajustes en la estabilidad, integridad y funcionalidad de las membranas celulares que les permite sobrevivir a esa condición durante 20 meses. Independientemente de la condición de riego *A. striata* presentó la permeabilidad menor de las membranas celulares ( $15.56$  y  $33.51 \mu S \text{ cm}^{-1} 100 \text{ mg}^{-1}$ ), mientras que *A. lechuguilla* y *A. salmiana* presentaron los valores mayores ( $101$  y  $137.71 \mu S \text{ cm}^{-1} 100 \text{ mg}^{-1}$ ) con riego y sin riego, respectivamente. Los resultados aportan evidencia de la mayor estabilidad de las membranas celulares de las plantas de *A. americana*, *A. angustifolia* y en contraste con *A. striata*, *A. salmiana* y *A. cupreata*, lo que permite sugerir que las especies tienen mecanismos diferentes para enfrentar el estrés por déficit de humedad.

### Innovación, impactos e indicadores

Nivel de Innovación	Descripción	Transferido	Impacto		Indicador General de Políticas Públicas	Indicadores Específicos	Subindicador
			Sector	Ámbito			
Innovación sostenible	Desarrollo de modelos que permitan conocer los mecanismos que le confieren resistencia al déficit de humedad prolongado en especies de <i>Agave</i> .	Gobierno de los Estados. Productores. Comunidades Agrarias.	Primario: Agricultura, Secundario: Procesos de Investigación, Desarrollo e Innovación.	Social. Económico. Ambiental.	Educación. Responsabilidad ambiental.	Recursos naturales. Capacitación.	Aplicación de técnicas y conocimientos tecnológicos para el desarrollo social y económico.