

ESCENARIOS DE DISTRIBUCIÓN DE *Agave potatorum* Zucc. ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO

Agave potatorum Zucc. DISTRIBUTION SCENARIOS IN THE FACE OF CLIMATE CHANGE

¹Pedro Antonio García-Morales , ^{1S}Vicente Arturo Velasco-Velasco , ¹José Raymundo Enríquez-del Valle , ¹Judith Ruiz- Luna , ²Abisai Josué García-Mendoza 

¹Tecnológico Nacional de México, Campus Valle de Oaxaca (ITVO). Ex hacienda de Nazareno, Xoxocotlán, Oaxaca, México. C.P. 71233. ²Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Instituto de Biología, Jardín Botánico. Apdo. postal 70-614, Coyoacán 04510 México, D.F. [§]Autor de correspondencia: (vicente.vv@voaxaca.tecnm.com).

RESUMEN

Los cambios ambientales afectan la distribución de especies de interés económico, como *Agave potatorum* fuente de materia prima para elaborar mezcal. El objetivo del estudio fue analizar la distribución potencial de *A. potatorum*, e identificar zonas potenciales de crecimiento bajo dos escenarios de cambio climático en Oaxaca y Puebla. Se consultaron ejemplares de herbario y se consideraron 22 variables ambientales. Se utilizó el Modelo Climático Global (MCG) alemán MPI-M y francés CNMR, bajo dos vías representativas de concentración de gases de efecto invernadero (RCP) rcp4.5 y rcp8.5 en un futuro medio al año 2050, las proyecciones se realizaron con el algoritmo MaxEnt. La distribución de *A. potatorum* con potencial alto abarca 11,725.8 km² en ambos estados, siendo la altitud y precipitación del trimestre más húmedo las variables que explican la distribución de la especie. La proyección mediante rcp4.5 y rcp8.5 para el modelo alemán se reducirá 72.6 % y 75.6 % respectivamente, para el modelo francés 68.5 % y 65.6 %, la expansión para ambos modelos aumentará 29.9 % y 19.5 % para el modelo alemán y para el modelo francés 21.1 % y 25.5 %. *A. potatorum* mantendrá su distribución sobre su nicho conocido, con reducciones y expansiones por efectos del cambio climático.

Palabras clave: MaxEnt, modelo climático global, nicho ecológico.

ABSTRACT

Environmental changes affect the distribution of interest economic species, such as *Agave potatorum* source of raw material to make mezcal. The objective of the study was to analyze the potential distribution of *A. potatorum*, and to identify potential growth zones under two climate change scenarios in Oaxaca and Puebla. Herbarium specimens were consulted, and 22 environmental variables were considered. The German MPI-M and French CNMR Global Climate Model (GCM) was used, under two representative greenhouse gas concentration pathways (RCP) rcp4.5 and rcp8.5 in the mid-future to the year 2050, the projections were made with the MaxEnt algorithm. The distribution of *A. potatorum* with high potential covers 11,725.8 km² in both states, being the altitude and precipitation of the wettest quarter the variables that explain the distribution of the species. The projection through rcp4.5 and rcp8.5 for the German model will be reduced 72.6 % and 75.6 % respectively, for the French model 68.5% and 65.6 %, the expansion for both models will increase 29.9 % and 19.5 % for the German model and for the French model 21.1 % and 25.5 %. *A. potatorum* will maintain its distribution over its known niche, with reductions and expansions because of climate change effects.

Index words: MaxEnt; global climate model; ecological niche.

INTRODUCCIÓN

En las dos décadas recientes, la demanda de materia prima para elaborar mezcal ha causado que los campesinos incrementen el aprovechamiento de poblaciones silvestres de agave, aumentando su riesgo de extinción (Valenzuela-Zapata & Sarita-Gaytan 2012; Vega-Vera & Pérez-Akaki, 2017). Al verse interrumpido su desarrollo, fisiología, reproducción, migración y distribución geográfica son menos resilientes a los cambios ambientales de su entorno (Nicolás-Tammone, 2016; Uribe-Botero, 2015). *Agave potatorum* Zucc. es una especie silvestre afectada por su aprovechamiento no sustentable.

En México, el uso de modelos climáticos globales (MCG), estima que durante el periodo 2020-2100, la tendencia es hacia un aumento de temperatura entre 0.5 y 4.8 °C y una reducción de la precipitación hasta 15 % en invierno y 5 % en verano a nivel nacional (Sosa-Rodríguez, 2015), tal incertidumbre afectaría el rendimiento de especies de interés económico. Por ello, la modelación de nicho ecológico de especies es una herramienta que permite predecir la presencia de especies en diferentes áreas con las mismas características y las tendencias de cambios a futuras condiciones ambientales (Phillips, Anderson & Schapire 2006; Rezende, de Oliveira-Filho, Eisenlohr, Yoshino-Kamino & Vibrans, 2015).

Torres-García (2015) indica que las áreas obtenidas con los mapas de distribución potencial contribuyen a la toma de decisiones para determinar sitios de conservación o establecimiento de cultivos de interés económico. Para su aplicación existen diversos programas como MaxEnt (Máxima entropía) que estima una distribución de probabilidad, mediante datos de presencia de especies y variables ambientales. Por lo anterior, el objetivo del presente estudio consistió en modelar la distribución potencial de *A. potatorum* mediante el uso de registros de herbarios y variables ambientales, así como

identificar zonas potenciales de crecimiento bajo diferentes escenarios de cambio climático en su área de distribución en Oaxaca y Puebla.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio y fuentes de información

La proyección de *A. potatorum* se realizó en los territorios de Oaxaca y Puebla, área de distribución natural conocida de la especie (García-Mendoza, 2011). Los registros de presencia se determinaron mediante la consulta de ejemplares en el Herbario Nacional de México (MEXU) y bases de datos en herbarios virtuales: Herbario de plantas vasculares de la Universidad Estatal de Arizona (ASU); Herbario de la Universidad de Arizona (ARIZ); Herbario Nacional de los Estados Unidos (US); Herbario del Jardín Botánico del Desierto (DES); Jardín Botánico de Missouri (MO) y Jstor Global Plants. Dicha información se complementó con registros y colectas de la especie en localidades de Oaxaca y Puebla. Posteriormente se elaboró una base de datos en Excel® y se eliminaron registros con información geográfica insuficiente, registros históricos dudosos y duplicados.

Selección de variables ambientales

Se consideraron 22 variables ambientales (Tabla I) en formato raster con resolución de 30s de arco, por lo cual se obtuvieron 19 variables bioclimáticas (Cuervo-Robayo, Téllez-Valdés, Gómez, Venegas-Barrera, 2013) y tres variables topográficas Altitud, Exposición y Pendiente, generadas a partir del modelo de elevación digital GTOPO30. Las variables se limitaron a los estados de Oaxaca, Puebla, Guerrero y Morelos. Dicha información fue procesada de imágenes raster a formato ascii en el software ArcGis® versión 10.5. Las variables se procesaron en un análisis de componentes principales (ACP) para minimizar la autocorrelación entre variables (Cruz-Cárdenas, López-Mata, Villaseñor y Ortiz, 2014) en el software estadístico PAST® versión 3.22.

Tabla I. Variables bioclimáticas y topográficas utilizadas para generar el modelo de distribución potencial de *A. potatorum* Zucc.

Acrónimo	Predictores ambientales
Bio1	Temperatura media anual
Bio2	Rango diurno medio (media mensual (temp. máx. - temp. mín))
Bio3	Isotermia (Bio2/Bio7) *(100)
Bio4	Estacionalidad de temperatura (Desv. Estand. * 100)
Bio5	Temperatura máxima del mes más cálido
Bio6	Temperatura mínima del mes más frío
Bio7	Rango anual de temperatura (Bio5 - Bio6)
Bio8	Temperatura media del trimestre más húmedo
Bio9	Temperatura media del trimestre más seco
Bio10	Temperatura media del trimestre más cálido
Bio11	Temperatura media del trimestre más frío
Bio12	Precipitación anual
Bio13	Precipitación del mes más húmedo
Bio14	Precipitación del mes más seco
Bio15	Temporada de precipitación
Bio16	Precipitación del trimestre más húmedo
Bio17	Precipitación del trimestre más seco
Bio18	Precipitación del trimestre más cálido
Bio19	Precipitación del trimestre más frío
EXP	Exposición
PE	Pendiente
Al	Altitud

Análisis de información

La evaluación del modelo se realizó en el software MaxEnt versión 3.4.1, un algoritmo que busca la uniformidad más cercana entre especies en un espacio geográfico (Alba-Sánchez, López-Sáez, Benito-de Pando, Linares, Nieto-Lugild y López-Merino, 2010; Phillips et al., 2006). La información se calibró empleando 75 % de los registros de la especie como entrenamiento y 25 % para validar el modelo. Se aplicaron 10 réplicas para el modelo, dejando las funciones predeterminadas del programa con 500 interacciones, umbral de convergencia de 0.00001 y 10,000 iteraciones (Giménez-Analía, Giannini-Norberto, Schiaffinni-Mauro, Matín-Gabriel, 2015; Martínez-Méndez, Aguirre-Planter, Eguiarte, Jaramillo-Correa, 2016; Ruíz-Sánchez, Mendoza-González & Rojas-Soto, 2018). Se consideró la salida logística el cual aporta un valor

entre 0 y 1 de probabilidad de presencia (Phillips, 2010).

La precisión del modelo se evaluó mediante el índice AUC (área bajo la curva) como estadístico de ajuste, y las variables ambientales que contribuyeron mejor al modelo se determinaron con el análisis Jackknife. Las salidas generadas se procesaron nuevamente en ArcGis y se agruparon en cuatro categorías, potencial alto (>0.6), potencial medio (0.4 – 0.6), potencial bajo (0.2 – 0.4) y no potencial (<0.2) (Zhang, Yao, Meng & Tao, 2018). Finalmente, la distribución de *A. potatorum* se proyectó sobre dos escenarios de cambio climático para el año 2050, considerando el modelo climático global (MCG) MPI-M y CNRM (modelo alemán y francés respectivamente) debido a que simulan envolturas climáticas relevantes para México (INECC, 2014).

Tabla 2. Registro de presencia de *A. potatorum* Zucc. en municipios de Oaxaca y Puebla.

Estado	Municipio	Longitud O	Latitud N	Altitud (m)
Oaxaca	Santa Cruz Xoxocotlán	96°46'26.58"	17°02'21.49"	1705
Oaxaca	San Felipe Tejalapam	96°51'15.05"	17°07'40.32"	1820
Oaxaca	San Lorenzo Cacaotepec	96°49'32.60"	17°05'55.50"	1746
Oaxaca	San Andrés Ixtlahuaca	96°51'44.90"	17°04'43.90"	1805
Oaxaca	San Tomas Mazaltepec	96°52'37.80"	17°08'17.34"	1775
Oaxaca	San Bartolo Coyotepec	96°40'30.18"	16°56'13.63"	1714
Puebla	San Juan Tianguismanalco	98°27'47.70"	18°58'34.07"	2174
Puebla	Puebla	98°07'52.16"	18°56'52.22"	2127

Se utilizaron las vías representativas de concentración (RCP) rcp4.5 y rcp8.5 de gases de efecto invernadero (GEI), asumiendo que para el rcp4.5 estos aumentarán moderadamente y se estabilizarán a finales de este siglo, mientras que el rcp8.5, supone un nivel muy alto de emisiones de GEI (IPCC, 2014). Dicha información se obtuvo del portal de la base de datos de WorldClim (Hijmans, Cameron, Parra, Jones & Jarvis, 2005).

RESULTADOS

Registros de la existencia de *A. potatorum*

Se registraron un total de 271 ejemplares de los diferentes herbarios, la depuración de la información se redujo a un total de 104 registros de presencia, al cual se le anexaron 8 registros de

la especie (Tabla 2) ubicados y recolectados en seis municipios de Oaxaca y dos de Puebla.

Distribución potencial de *Agave potatorum* Zucc.

De acuerdo con el análisis de componentes principales (ACP) las variables ambientales no correlacionadas se situaron en los cuatro primeros componentes con 97.2 % de varianza, estas fueron altitud, exposición, precipitación anual y precipitación del trimestre más húmedo. El área bajo la curva (AUC) para *A. potatorum* presentó un ajuste de 0.901 para los datos de entrenamiento y 0.861 para los datos de validación (Figura 1). Elith, Graham, Anderson, Dudík, Ferrier, Guisan (2006) mencionan que los valores >0.7 indican un buen ajuste, por lo tanto, el modelo de *A. potatorum* fue satisfactorio al presentar un ajuste por encima de lo esperado al azar.

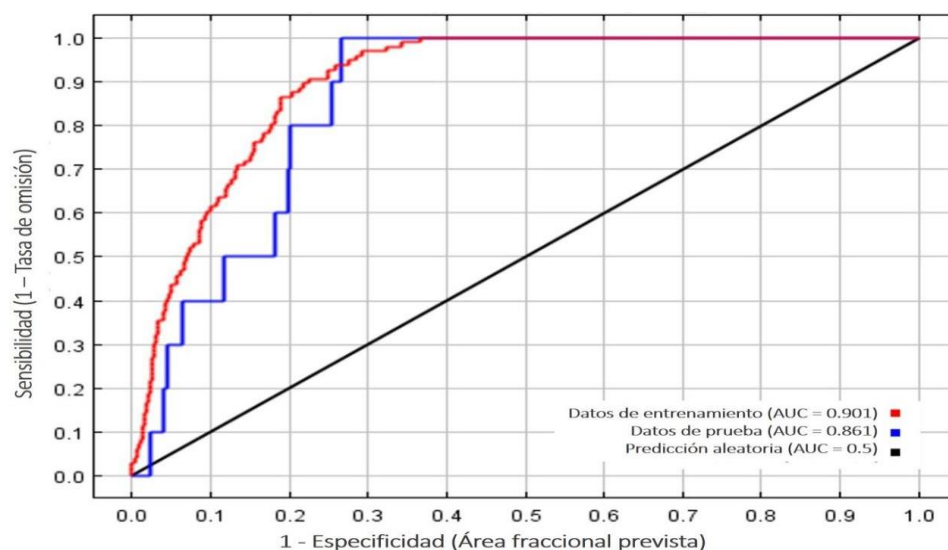


Figura 1. Área bajo la curva para *A. potatorum* Zucc., respecto a datos de entrenamiento, prueba y predicción aleatoria.

Tabla 3. Variables ambientales que condicionan la distribución potencial de *A. potatorum* Zucc. en los estados de Oaxaca y Puebla.

Variable	Valor mínimo	Valor máximo	% contribución
Altitud	879 m	2790 m	51.0
Precipitación del trimestre más húmedo	212 mm	963 mm	44.3
Exposición azimut	0.26°	355°	3.0
Precipitación anual	418 mm	1801 mm	1.6

Variables de importancia ambiental

El análisis Jackknife (**Tabla 3**) determinó que la altitud contribuye con 51 % en la distribución de la especie, encontrándose en un intervalo de 879 a 2790 m.

La precipitación del trimestre más húmedo (julio, agosto, septiembre) fue la segunda variable con 44.3 % de contribución. Los registros de *A. potatorum* señalan que se encuentra en un intervalo de 212 a 963 mm de precipitación trimestral. Sin embargo, no se descartaría la importancia de la precipitación anual, aunque con

menor contribución al modelo (1.6 %). Probablemente, el aprovechamiento del agua para la especie es más eficiente en periodos de mayor humedad.

La exposición contribuyó con 3 % en la distribución de *A. potatorum* donde los valores $<0.26^\circ$ y $>355^\circ$ indican que algunos sitios con orientación norte no son viables para su desarrollo, aunque la información es escasa para la especie. Las áreas de distribución con idoneidad alta para Oaxaca y Puebla (**Figura 2**) abarcan una superficie de 6,706.7 km² y 5,019.1 km², respectivamente.

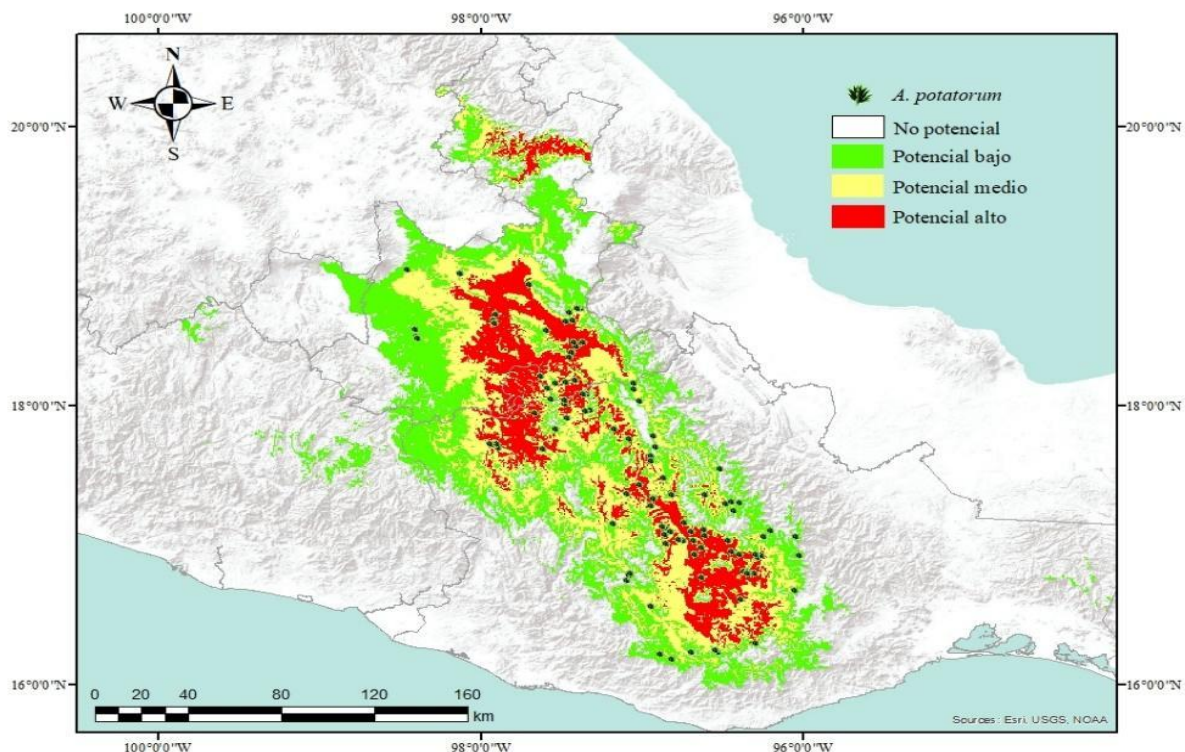


Figura 2. Distribución potencial de *A. potatorum* Zucc. en Oaxaca y Puebla. Fuente: elaboración propia.

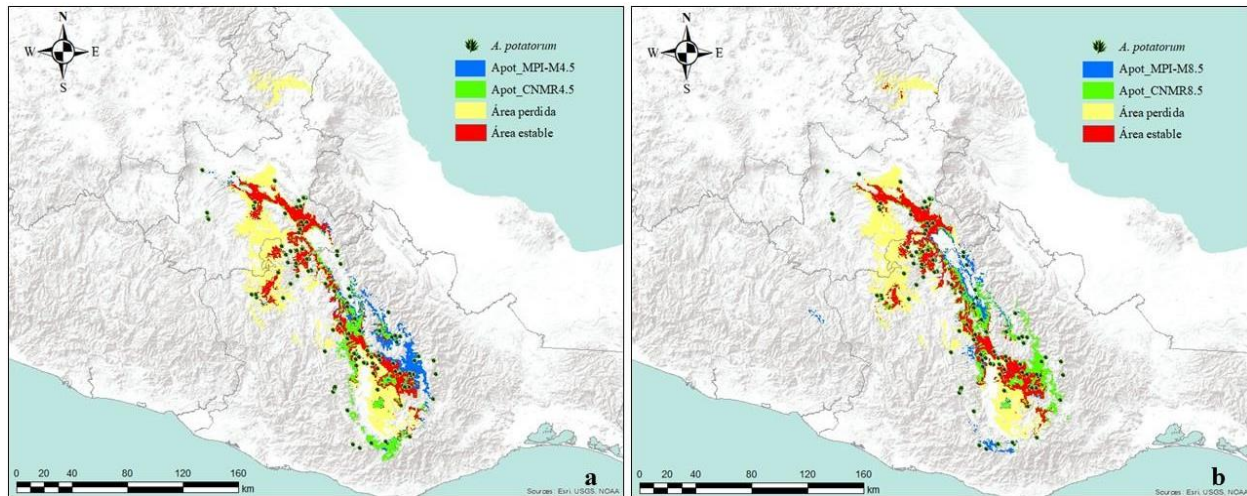


Figura 3. Distribución potencial de *A. potatorum* Zucc. proyectada al año 2050. En azul, expansión para MPI-M bajo rcp4.5 y rcp8.5. En verde, expansión para CNMR bajo rcp4.5 y rcp8.5. En amarillo, área perdida hacia el año 2050. En rojo, coincidencia de la distribución potencial actual, con ambos modelos al año 2050. Fuente: elaboración propia.

Distribución de *Agave potatorum* ante el cambio climático

Para la proyección al año 2050, se consideró el valor del potencial alto de la distribución conocida de *A. potatorum* debido a que son sitios con mayor idoneidad ambiental para la especie. La información mostró que la distribución potencial tiende a reducirse e incrementar con los dos MCG bajo ambos rcp4.5 y rcp8.5 (**Figura 3**). Para el caso del rcp4.5, el modelo CNMR se reduce 68.5 % y para el modelo MPI-M 72.6 % con base en su distribución actual. Por otra parte, el modelo CNMR para el rcp8.5 disminuye 65.6 % y para el modelo MPI-M 75.6 %. Los sitios óptimos se reducirán para la región Balsas en Oaxaca y Puebla, región Tehuantepec y Costa Chica-río Verde en Oaxaca y en la región Tuxpan-Nautla, Puebla. El aumento de superficies idóneas, se desplazarán ligeramente al estado de Morelos 0.01 % respecto al modelo CNMR bajo el rcp4.5 y 0.02 % para el modelo MPI-M, este último bajo el rcp8.5 abarcaría 0.05 % en Guerrero. En Oaxaca y Puebla, la especie ampliaría 21.1 % su rango de distribución con el modelo CNMR rcp4.5 y 29.9 % para el modelo MPI-M. Con el rcp8.5 ambos modelos aumentarían 25.5 % y 19.5 %, respectivamente.

DISCUSIÓN

En Oaxaca, los sitios óptimos para el crecimiento de *A. potatorum* se ubican en la provincia Sierra Madre del Sur y en Puebla, en el Eje Neovolcánico y Sierra Madre Oriental. García-Mendoza (2010) indica que esta especie se distribuye en el extremo oriental de la cuenca río Balsas, el Valle Tehuacán-Cuicatlán, sierras Mixtecas y montañas que rodean los Valles Centrales de Oaxaca. Los resultados mostraron que existe baja idoneidad en los estados de Guerrero y Morelos probablemente porque los modelos de distribución de especies esporádicamente tienden a sobreestimar estos análisis (Maciel-Mata, Manríquez-Morán, Octavio-Aguilar & Sánchez-Rojas, 2015), por ello, Ocaña-Nava, García-Mendoza & Larson (2007) sugieren realizar la verificación en campo para validar estos modelos sobre la posible existencia de una especie en un sitio hipotético.

Ocaña-Nava et al. (2007) indican que los intervalos adecuados de altitud para *A. potatorum* son de 1000 a 2500 m siendo incapaz de crecer por encima de los 3000 m. Por otra parte, García-Mendoza (2010) menciona que esta especie se encuentra en un intervalo altitudinal de 1300 a 2400 m. (León-Vázquez, Campos-Ángeles,

Enríquez-del Valle, Velasco-Velasco, Marini-Zúñiga & Rodríguez-Ortíz, 2013) aluden que la altitud es uno de los factores más importantes que determinan la distribución de las especies de agave, dentro de ellas *A. potatorum*.

Ocaña-Nava et al. (2007) determinaron que la precipitación anual más favorable en áreas óptimas de distribución potencial para *A. potatorum* es de 600 a 1200 mm. No obstante, en el presente estudio la información sugiere que los sitios óptimos de precipitación anual para la especie requieren de 418 a 1801 mm de humedad.

Ruiz, Medina, Gonzáles, Flores, Ramírez, Ortiz, Byerly & Martínez (2013) mencionan que los sitios con exposición norte y laderas que presentan corrientes de aire muy frío no son óptimos para el desarrollo de *A. tequilana* y *A. salmiana*, posiblemente ocurriría lo mismo con *A. potatorum*.

Arribas, Abellán, Velasco, Bilton, Lobo, Millán y Sánchez (2012) mencionan que la reducción y expansión de sitios óptimos para una especie se debe principalmente a su capacidad de adaptación, pues adecuan sus preferencias a estas nuevas condiciones ambientales si se encuentran dentro de su rango de tolerancia, sin necesidad de modificar sus rangos de distribución, *A. potatorum* como especie endémica, afrontaría estos cambios ambientales sobre su nicho conocido.

La información generada indica que la reducción de estos lugares es mayor en comparación a los sitios de expansión. Sork-L, Davis, Westfall, & Flint (2010) aluden que los estudios de cambio climático sobre la distribución de especies presentan efectos negativos, pues las áreas de retracción son mayores en comparación a las zonas de expansión. Sin embargo, Nobel (2011) menciona que las especies de agaves son capaces de tolerar el cambio climático gracias a su adaptación fisiológica, pero si los agaves en un futuro serán capaces de tolerar el cambio climático, ¿por qué *A. potatorum* reduciría en mayor proporción áreas óptimas en vez de aumentarlas?

Daubenmire (2001) menciona que las especies con distribución ecológica reducida se encuentran sujetas a la extinción si presentan baja variabilidad genética y cambios en su ambiente si exceden su tolerancia, o pueden persistir si el ambiente permanece favorable, alcanzando variabilidad a través de la acumulación de mutaciones. No obstante, el uso no sustentable que se ejerce en las poblaciones de *A. potatorum* como fuente de sustento y de ingreso en materia mezcalera impediría su desplazamiento y pérdida de variabilidad genética, siendo menos tolerantes al cambio climático afectando su distribución.

Finalmente, los modelos climáticos globales (MCG) pueden emplearse para detectar comportamientos anómalos, que puede servir para descartar modelos, pero no para determinar cuáles son mejores (Pérez-García, Méndez-García & Méndez-Incera, 2012). Para el caso del MCG MPI-M y CNRM, estos tienden a ser un tanto similares sobre las mismas áreas de distribución y mostraron adecuarse al área conocida de *A. potatorum*. Sin embargo, son posibles hipótesis que permiten predecir el comportamiento de distribución de la especie a través del tiempo, por efectos del cambio climático.

CONCLUSIONES

Los sitios con mayor idoneidad ambiental para *Agave potatorum* se encuentran principalmente en Oaxaca y Puebla, con muy poca probabilidad en Morelos y Guerrero, siendo la altitud (51 %) y precipitación del trimestre más húmedo (44.3 %) las variables ambientales que condicionan su distribución. Las proyecciones de cambio climático a 2050 con los MCG MPI-M y CNRM bajo ambos rcp4.5 y rcp8.5, sugieren que *A. potatorum* reducirá su distribución, principalmente sobre la región del río Balsas, Valles Centrales de Oaxaca y la región Tuxpan-Nautla en Puebla. Las zonas potenciales seguirán siendo idóneas sobre los valles de Oaxaca y valles de Puebla, expandiéndose sobre las sierras orientales de estos estados. Sin embargo, la extracción para la elaboración de mezcal, de

plantas adultas en etapa reproductiva puede influir negativamente en la distribución de la especie hacia los nuevos sitios que predicen los modelos.

REFERENCIAS

- Alba-Sánchez, F., López-Sáez, J. A., Benito-de Pando, B., Linares, J. C., Nieto-Lugilde, D., & López-Merino, L. (2010). Past and present potential distribution of the Iberian *Abies* species: a phytogeographic approach using fossil pollen data and species distribution models. *Diversity and Distributions*, 16, 214–228. <https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2010.00636.x>
- Arribas, P., Abellán, P., Velasco, J., Bilton, D. Y., Lobo, J. M., Millán, A., & Sánchez-Fernández, D. (2012). La vulnerabilidad de las especies frente al cambio climático, un reto urgente para la conservación de la biodiversidad. *Ecosistemas*, 21(3), 79–84. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2012.21-3.10>
- Cruz-Cárdenas, G., López-Mata, L., Villaseño, J. L., & Ortiz, E. (2014). Potential species distribution modeling and the use of principal component analysis as predictor variables. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85, 189–199. <https://doi.org/10.7550/rmb.36723>
- Cuervo-Robayo, A. P., Téllez-Valdés, O., Gómez-Albores, M. A., Venegas-barrera, C. S., Manjarrez, J., & Mart, E. (2013). An update of high-resolution monthly climate surfaces for Mexico. *International Journal of Climatology*, 34, 2427–2437. <https://doi.org/10.1002/joc.3848>
- Daubenmire, R. F. (2001). *Ecología vegetal: tratado de autoecología de plantas* (3a ed.). Limusa.
- Elith, J., Graham, C. H., Anderson, R. P., Dudík, M., Ferrier, S., Guisan, A., Hijmans, R. J., Huettmann, F., Leathwick, J. R., Lehmann, A., Li, J., Lohmann, L. G., Loiselle, B. A., Manion, G., Moritz, C., Nakamura, M., Nakazawa, Y., Overton, J. McC., Peterson, A. T., Phillips, S. J., Richardson, K. S., Scachetti-Pereira, R., Schapire, R. E., Soberón, J., Williams, S., Wisz,
- M. S. and, Zimmermann, N. E. (2006). Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*, 29, 129–151. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.2006.0906-7590.04596.x>
- García-Mendoza, A. J. (2010). Revisión taxonómica del complejo *Agave potatorum* Zucc. (agavaceae): nuevos taxa y neotipificación. *Acta Botánica Mexicana*, 91, 71–93. <http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sciarttext&pid=S018771512010000200008>
- García-Mendoza, A. J. (2011). *Flora del valle de Tehuacán-Cuicatlán*. Departamento de Botánica. Instituto de Biología. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Giménez-Analía, L., Giannini-Norberto, P., Schiaffini-Mauro, I., & Martin-Gabriel, M. (2015). Geographic and Potential Distribution of a Poorly Known South American Bat, *Histiotus macrotus* (Chiroptera: Vespertilionidae). *Acta Chiropterologica*, 17(1), 143–158. <https://doi.org/10.3161/15081109ACC2015.17.1.012>
- Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G., & Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces of global land areas. *International Journal of Climatology*, 25, 1965–1978. <https://doi.org/10.1002/joc.1276>
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2014). *Estudio para la incorporación de nuevas variables en los escenarios de cambio climático para México utilizados en la Quinta Comunicación Nacional*. CICESE, SEMARNAT, & INECC. <https://www.gob.mx/inecc/es/documentos/elaboracion-de-un-protocolo-para-la-incorporacion-de-nuevas-variables-en-los-escenarios-de-cambio-climatico-para-las-comunicaciones>
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). (2014). *Cambio climático 2014 Informe de síntesis. Contribución de los grupos de trabajo I, II y III*

- al quinto informe de evaluación del grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático. Organización Meteorológica Mundial (OMM). https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_es.pdf
- León-Vázquez, N. I., Campos-Ángeles, G. V., Enríquez-del Valle, J. R., Velasco-Velasco, V. A., Marini-Zúñiga, F., y Rodríguez-Ortiz, G. (2013). Diversidad de especies de agave en San Miguel Tilquiapam, Ocotlán, Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6, 1185–1195.
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342013001000010
- Maciel-Mata, C. A., Manríquez-Morán, N., Octavio-Aguilar, P., & Sánchez-Rojas, G. (2015). El área de distribución de las especies: revisión del concepto. *Acta Universitaria*, 25(2), 3–19.
<https://doi.org/10.15174/au.201>
- Martínez-Méndez, N., Aguirre-Planter, E., Eguiarte, L. E., & Jaramillo-Correa, J. P. (2016). Modelado de nicho ecológico de las especies del género *Abies* (Pinaceae) en México: algunas implicaciones taxonómicas y para la conservación. *Botanical Sciences*, 94(1), 5–24. <https://doi.org/10.17129/botsci.508>
- Nobel, P. S. (2011). *Sabiduría del desierto agaves y cactus* (2a ed.). Biblioteca Básica de Agricultura.
- Ocaña-Nava, D., García-Mendoza, A., & Larson, J. (2007). Modelación supervisada de la distribución de magueyes mezcaleros en México y sus posibles aplicaciones. In P. Colunga-GarcíaMarín, A. Larqué Saavedra, L. E. Eguiarte, & D. Zizumbo-Villareal (Eds.), *En lo ancestral hay futuro: del tequila, los mezcales y otros agaves* (pp. 153–174). Centro de Investigación Científica Yucatán, A.C.; Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología; Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad Instituto Nacional de Ecología.
- Pérez-García, J., Méndez-García, M. & Méndez-Incera, F. J. (2012). Habilidad de los modelos climáticos globales para el desarrollo de proyecciones regionales. In C. Rodríguez P., A. Ceballos B., N. González R., E. Morán T., & A. Hernández E. (Eds.), *Cambio climático. Extremos e impactos* (Asociación, pp. 187–196). Oficina Española de Cambio Climático mediante, Ministerio de Economía y Competitividad.
<http://hdl.handle.net/20.500.11765/8272>
- Phillips, S. (2010). A Brief Tutorial on Maxent. *Lessons in Conservation*, 3, 108–135. ncep.amnh.org/linc/
- Phillips, S. J., Anderson, R. P. & Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190, 231–259.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>
- Rezende, V. L., De Oliveira-Filho, A. T., Eisenlohr, P. V., Kamino, L. H. Y., & Vibrans, A. C. (2015). Restricted geographic distribution of tree species calls for urgent conservation efforts in the Subtropical Atlantic Forest. *Biodiversity and Conservation*, 24(5), 1057–1071.
<https://doi.org/10.1007/s10531-014-0721-7>
- Ruiz-Sánchez, E., Mendoza-González, G. & Rojas-Soto, O. (2018). Mexican priority bamboo species under scenarios of climate change. In *Ecology* (Vol. 96, Issue 1). <https://doi.org/10.17129/botsci.1206>
- Ruiz C., J. A., G. Medina, G., González A., I. J., Flores L., H. E., Ramírez O, G., Ortiz T., C., Byerly M., K. F. & Martínez P., R. A. (2013). *Requerimientos agroecológicos de cultivos*. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias-CIRPAC-Campo Experimental Centro Altos de Jalisco.
- Sork, V. L., Davis, F. W., Westfall, R., Flint, A., Ikegami, M., Wang, H. & Grivet, D. (2010). Gene movement and genetic association with regional climate gradients in California valley oak (*Quercus Née*) in the face of climate change. *Molecular Ecology*, 19, 3806–3823.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-294X.2010.04726.x>

- Sosa-Rodríguez, F. S. (2015). Política del cambio climático en México: avances, obstáculos y retos. *Realidad, Datos y Espacio. Revista Internacional de Estadística y Geografía*, 6, 4–23. https://www.inegi.org.mx/rde/rde_15/doctos/rde_15_art1.pdf
- Nicolas-Tammone, M. (2016). Pérdida de diversidad genética: implicaciones para la evolución y la conservación de dos especies de *Ctenomys* (Rodentia: Ctenomyidae) en Patagonia norte [Universidad Nacional del Comahue]. <http://www.redalyc.org/pdf/457/45746645028.pdf>
- Torres-García, I. (2015). Distribución, aprovechamiento y manejo del maguey alto en el Estado de Michoacán, aportes para encaminar su sustentabilidad. In S. Martínez-Palacios, A.; Morales-García, J. L. y Guillen-Rodríguez (Ed.), *Aspectos sobre manejo y conservación de Agaves mezcaleros en Michoacán* (pp. 153–163). SAGARPA, COFUPRO. https://www.researchgate.net/profile/Ignacio_Torres-Garcia/publication/280091738_Distribucion_aprovechamiento_y_manejo_del_maguey_alto_en_el_estado_de_Michoacan_aportes_para_encaminar_su_sustentabilidad/links/56d2082e08ae4d8d64a5f199.pdf
- Uribe-Botero, E. (2015). El cambio climático y sus efectos en la biodiversidad en América Latina. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). Naciones Unidas. Unión europea. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/39855-cambio-climatico-sus-efectos-la-biodiversidad-america-latina>
- Valenzuela-Zapata, A. G., & Sarita-Gaytan, M. (2012). Sustaining Biological and Cultural Diversity: geographic indications and traditional mezcal production in Jalisco, Mexico. *Revue d'ethnoécologie*, 1–20. <https://doi.org/10.4000/ethnoecologie.990>
- Vega-Vera, N. V., & Pérez-Akaki, P. (2017). Oaxaca y sus regiones productoras de mezcal: Un análisis desde cadenas globales de valor. *Prospectivas Rurales. Nueva Época*, 29, 103–132. <https://www.revistas.una.ac.cr/index.php/perspectivasrurales/article/view/9286/11001>
- Zhang, K., Yao, L., Meng, J., & Tao, J. (2018). Science of the Total Environment Maxent modeling for predicting the potential geographical distribution of two peony species under climate change. *Science of the Total Environment*, 634, 1326–1334. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.112>