

Distribución de *Phaseolus vulgaris* en áreas de Hidalgo con riesgo de derrame de hidrocarburos

Abraham Palacios Romero^{1*}, Rodrigo Rodríguez-Laguna², Ramón Razo-Zárate² y Edith Jiménez Muñoz³

Escuela de Ingeniería y Ciencias¹, Instituto de Ciencias Agropecuarias², Escuela Superior de Apan³
Tecnológico de Monterrey¹, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo², Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo³
Pachuca¹, Tulancingo¹, Apan³; Hgo. México

*Autor de correspondencia: abraham.palacios@tec.mx

Abstract— A map of areas with potential for oil spills was elaborated based on the location of pipelines, storage plants and refineries in Hidalgo state and this was compared with a potential distribution map of *P. vulgaris*, which was obtained with the MaxEnt algorithm and it was validated with receiver operating characteristic curve. With the Jackknife test the limiting variables for the distribution of this species were determined. *P. vulgaris* can be established in an area of 6291.64 km² that coincide with the areas of greatest risk of spills in the state. The Jackknife test indicates that the variables associated with temperature are the most important in the model.

Keyword— *Echological niche, MaxEnt, potential distribution, phytoremediation.*

Resumen— Se elaboró un mapa de zonas con potencial de derrames de hidrocarburos a partir de localización de ductos, centrales de almacenamiento y refinerías en el estado de Hidalgo y este fue comparado con un mapa de distribución potencial de *P. vulgaris*, el cual fue obtenido con el algoritmo MaxEnt y validado con un análisis del área bajo la curva. Con la prueba Jackknife se determinaron las variables limitantes para la distribución de esta especie. *P. vulgaris* puede establecerse en un área de 6291.64 km² que coinciden con las zonas de mayor riesgo de derrames en el estado. La prueba Jackknife indica que las variables asociadas a temperatura son las de mayor peso en el modelo.

Palabras claves— *Distribución potencial, fitorremediación, MaxEnt, nicho ecológico.*

I. INTRODUCCIÓN

En México existen grandes áreas contaminadas con hidrocarburos debido a derrames y las actividades de la industria petrolera, provocando pérdida de funciones fisiológicas en la cobertura vegetal y el suelo; así como consecuencias negativas para la cadena alimenticia y para la salud humana [1]. Estas afectaciones se han incrementado debido a prácticas inadecuadas aún presentes en la industria petrolera nacional [2]. El estado de Hidalgo es una zona prioritaria en relación con posibles derrames de hidrocarburos, ya que en esta región se encuentra la refinería de Tula, la de mayor capacidad instalada en el país, y su área de influencia abarca una longitud de 1220 km [3].

El riesgo en cuanto a derrames para esta zona estriba en que los derechos de vía de Petróleos Mexicanos (PEMEX) cruzan las zonas industriales y urbanas más densamente pobladas del país [3]. Sin embargo, a pesar de ser prioritario, muchos estados y municipios no cuentan con un Atlas de Riesgo ambiental. Los Atlas de Riesgos son instrumentos implementados por los gobiernos para identificar los distintos tipos de riesgo asociados a peligros naturales y amenazas y de esta manera poder implementar medidas de reducción de vulnerabilidad y mitigación de dichas amenazas [4]. De entre los procesos existentes para remediar las afectaciones, los métodos biológicos (procesos de biorremediación) que se basan en el aprovechamiento y optimización de las capacidades biodegradadoras naturales de hongos, bacterias y plantas están ganando cada vez más terreno por su versatilidad, beneficios y bajo costo [5]. De entre estos métodos, destaca especialmente la fitorremediación, técnica que ha sido probada con éxito en la remediación de contaminantes orgánicos e hidrocarburos [6], [7]. *Phaseolus vulgaris* es una de las especies más utilizadas en los procesos de fitorremediación [8]–[10] ya que también mejora las

condiciones del suelo, previene la erosión, sirve como hábitat para especies silvestres, es de bajo costo y puede combinarse con otras metodologías de remediación [11]. Sin embargo, como toda planta, su capacidad para establecerse en un espacio geográfico puede verse comprometida por factores climáticos y ambientales [12]. Por lo que, antes de ser utilizada se requiere determinar la idoneidad del sitio para poder utilizarla.

Los modelos de nicho ecológico proporcionan información sobre tolerancia de las especies a factores climáticos, evalúan su afinidad y determinan la probabilidad de establecimiento en un espacio geográfico [13] y se han convertido en la principal herramienta para determinar la distribución potencial de especies [14]. Actualmente, existen aproximadamente 16 modelos de nicho ecológico y dentro de estos modelos, destaca Maxent un programa basado en una aproximación estadística llamada máxima entropía que permite hacer predicciones utilizando datos de presencia u ocurrencia de la distribución potencial de una especie [15]. Este método tiene varias ventajas respecto a otros, entre las que destacan el solo requerir datos de presencia, tiene un buen desempeño en comparación con otros métodos similares y funciona muy bien con un número pequeño de muestras [16].

Tomando en cuenta lo anterior se elaboró un mapa de zonas con potencial de derrames de hidrocarburos y se comparó con uno de distribución potencial de *P. vulgaris* para determinar si existían zonas de convergencia donde la especie pudiera ser usada hipotéticamente en procesos de fitorremediación.

II. MATERIAL Y MÉTODOS

La distribución potencial de *P. vulgaris* en el estado de Hidalgo fue determinada mediante el algoritmo MaxEnt 3.3.3. Al cual se le introdujo un conjunto de 20 puntos georreferidos de la especie (Fig. 1) obtenidos de la Global Biodiversity Information Facility (GBIF) [17], la cual es un organización internacional que busca promover que los datos científicos sobre biodiversidad que estén disponibles. Esta información es proporcionada por instituciones de todo el mundo, por lo cual es información robusta y fidedigna. Se utilizaron capas en formato digital de variables bioclimáticas obtenidos de WorldClim, una base de datos de información climática con una resolución de 1km².

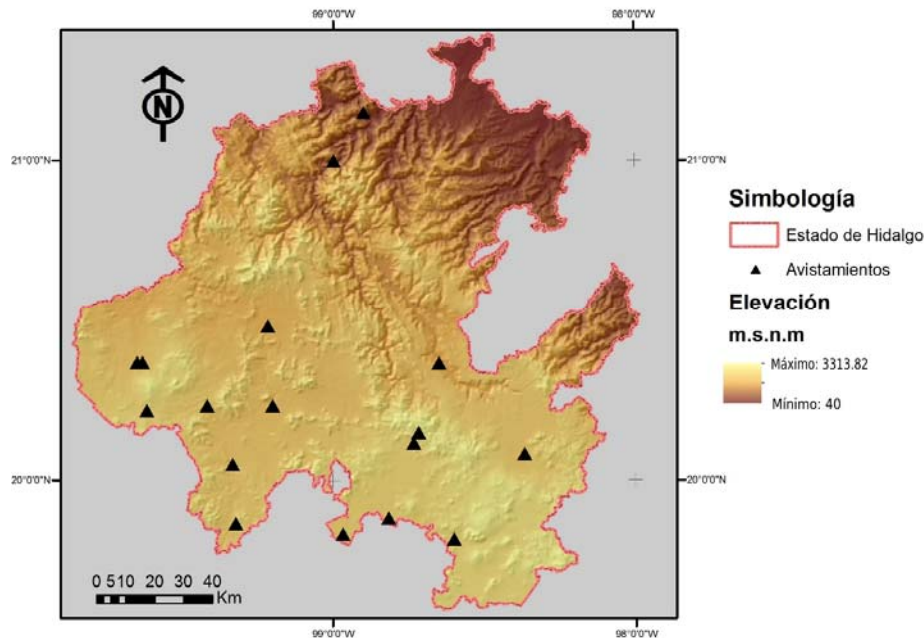


Fig. 1. Geolocalización de avistamientos de *P. vulgaris*.

Se utilizó la función logística en el modelo MaxEnt, para su calibración se realizaron 50 iteraciones con un límite de convergencia de 0.00001 y valor de regularización de 1.0 (valores por defecto). El modelo fue validado mediante un análisis del área bajo la curva AUC de la función ROC (Receiver Operating Characteristic) [18], [19]. Este análisis es una representación gráfica de la sensibilidad frente a la especificidad para un sistema clasificador binario según se varía el umbral de discriminación; en otras palabras, es una medida indicadora de la capacidad de discriminación del modelo con valores que van de cero a uno y entre más cercano este a uno, el modelo es más preciso [20]. Una vez obtenido el modelo de distribución potencial con su respectiva validación, se procedió a determinar cuáles era las variables bioclimáticas limitantes para la distribución de la especie con ayuda de la prueba Jackknife; la cual determina las contribuciones individuales de cada una de las variables al modelo.

La información referente a localización de ductos de conducción de hidrocarburos en el estado, así como centrales de almacenamiento y refinerías se obtuvo de la base de información vectorial topográfica del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (escala 1: 50,000). A partir de la obtención de esta información, se generó en un SIG un mapa del estado de Hidalgo con tres áreas de influencia a 500, 1000 y 2000 m de distancia de las probables fuentes de derrame (ductos, centrales de almacenamiento y refinería). Para el presente trabajo, se consideraron tres áreas de riesgo de acuerdo con la distancia lineal a la infraestructura de conducción y almacenamiento de hidrocarburos.

Otros trabajos han detectado vulnerabilidad a los derrames de hidrocarburos basados en las características de los suelos, permeabilidad, presencia de fallas o fracturas geológicas, o acuíferos, características de dispersión del hidrocarburo, entre otras [21]. Sin embargo, en esta aproximación, dada la escala estatal de uso de la información y el enfoque mayormente geográfico, se utiliza una distancia lineal constante a las fuentes de derrames, bajo la lógica de que entre más cerca de la fuente de derrame, mayor sería la afectación. Una vez obtenido el mapa de potencial de derrames, se sobrepuso con el de distribución potencial de *P. vulgaris* y se determinaron aquellos municipios en los cuales se interceptaban los oleoductos con áreas cuya aptitud para el establecimiento de la especie, de acuerdo con el modelo de nicho ecológico, era óptima.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El mapa de distribución potencial de *P. vulgaris* muestra que esta especie tiene la mayor probabilidad de establecerse en un área de 6291.64 km², especialmente en la región central, oriental y sur; abarcando 68 municipios (Fig. 2), de los cuales destacan Atotonilco el Grande, Metztitlán, Zempoala, Apan, Tianguistengo, Ajacuba, Huasca de Ocampo, Cuauhtepic de Hinojosa, Actopan y Tepeapulco, ya que son los que presentan las mayores extensiones de áreas óptimas (Tabla I). Estas áreas fueron obtenidas usando la opción de “calcular geometría” del SIG. Se puede notar que, de acuerdo con el modelo de distribución potencial, *P. vulgaris* se podría establecer en zonas áridas y semiáridas del estado de Hidalgo (que correspondería con el sur, centro y occidente del estado), lo que se puede corroborar con lo expuesto por Jiménez Galindo & Acosta Gallegos (2012) [22] en cuyo trabajo afirman que el centro de origen y diversificación de otras especies del género son las zonas áridas del norte de la República Mexicana.

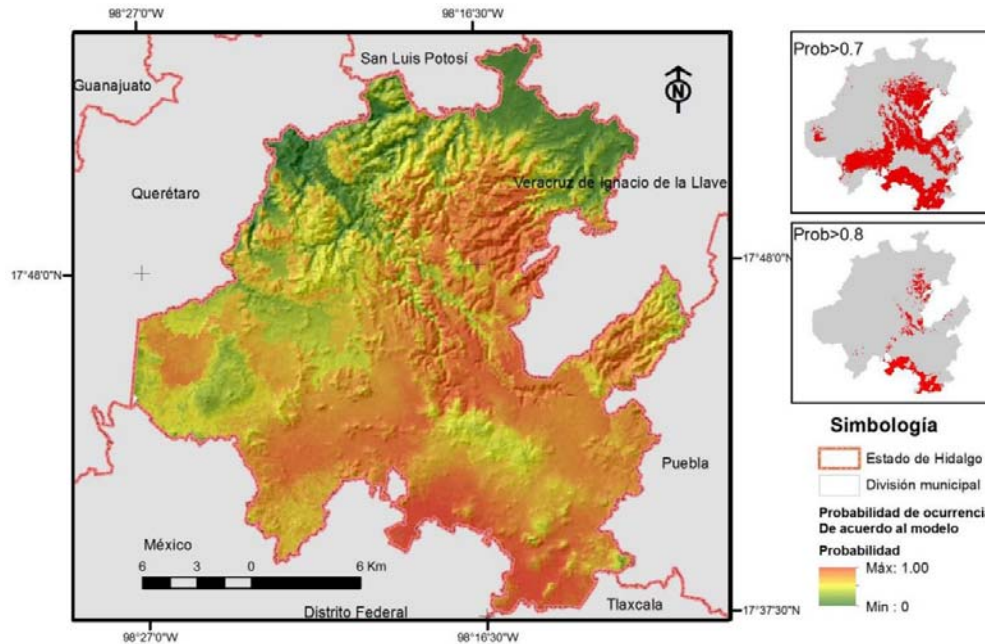


Fig. 2. Distribución potencial de *P. vulgaris* en el estado de Hidalgo

Con respecto a la validación, la función ROC tiene un valor de 0.988, para los datos de entrenamiento y de prueba, lo que indica un ajuste excelente ya que entre mayor sea este valor el modelo definirá una distribución más precisa para la especie (Fig. 3). Esto se corrobora con los resultados obtenido por Contreras Medina, Luna Vega, & Ríos Muñoz (2010) y Ávila, Villavicencio, & Ruiz (2014) que reportan valores ROC de 0.997 y 0.971 en sus ensayos con las especies *Taxus globosa* y *Pinus herrerae* respectivamente y concluyen que sus modelos son muy precisos en la predicción de ligares potenciales para el establecimiento de esas especies. Estos resultados también indican la ausencia de errores de omisión por lo que el modelo es idóneo para describir la realidad, tal como indica de Pando y Peña de Giles (2007) en su ensayo, donde indican que valores AUC altos indican una mejor capacidad de predicción del modelo.

Tabla I. Municipios con áreas potenciales para el establecimiento de *P. vulgaris*

Municipio	Área municipal (km ²)	Área con aptitud >70% (km ²)	Porcentaje del municipio con aptitud >70%
Actopan	269.7	187.97	69.7
Ajacuba	237.23	210.42	88.7
Apan	320.12	286.84	89.6
Atotonilco el Grande	454.92	403.63	88.73
Cuautepec de Hinojosa	388.62	190.09	48.92
Huasca de Ocampo	300.55	201.39	67.01
Metztitlán	790.36	385.57	48.78
Tepeapulco	241.28	183.27	75.96
Tianguistengo	253.26	216.85	85.62
Zempoala	317.64	287.15	90.4

De acuerdo con la prueba Jackknife, las variables asociadas a la temperatura son las que aportan mayores ganancias al modelo de manera individual. Mientras que las variables de precipitación en el cuartil más frío y en el más seco, son las que aportan menor ganancia. De acuerdo con el modelo, la altitud tiene un impacto menor a la temperatura en la distribución potencial de *P. vulgaris* (Fig. 4), lo que se puede atribuir al rango de distribución altitudinal de la especie que va desde 1000 hasta 1800 msnm [23] lo que concuerda con lo reportado para otras especies de intervalos altitudinales estrechos [19], [24]. Al elaborar el mapa de riesgo potencial de derrames, se observa que las zonas más propensas a ello se encuentran principalmente en el sur del estado, lo que es concordante con la realidad, ya que es en esta región donde se ubican las terminales de almacenamiento y la gran mayoría de oleoductos, también son zonas con una alta densidad poblacional, así como tasas de crecimiento muy elevadas [25]. Esto indica la urgencia de crear Atlas de Riesgo más detallados para poder establecer mecanismos para prevenir y, en caso de ser necesario, mitigar cualquier derrame de hidrocarburos en la región (Fig. 5).

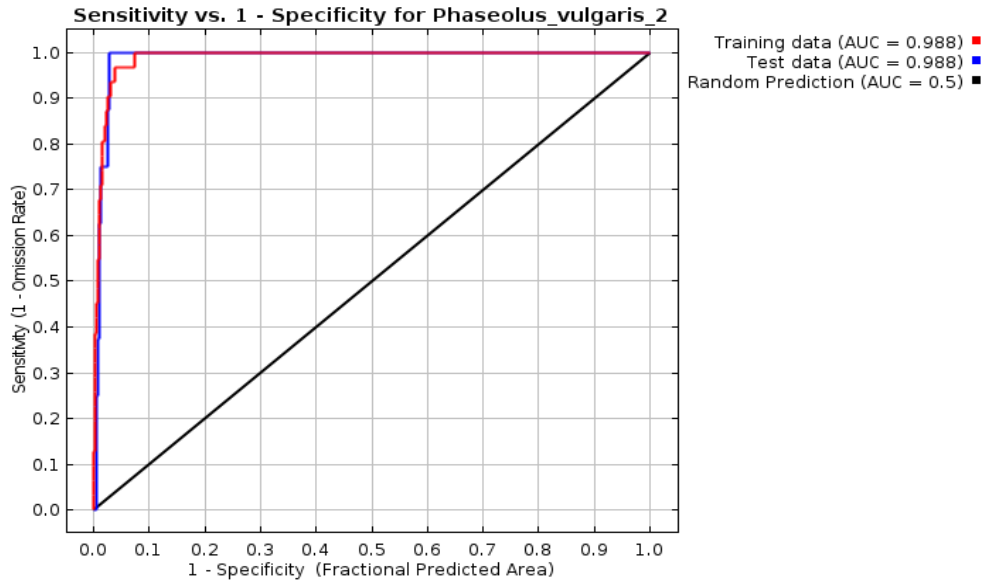


Fig. 3. Análisis de área bajo la curva (ROC)

Al comparar el mapa de distribución potencial de *P. vulgaris* con el de potencial de derrames, se observa que esta especie sería una buena opción para considerar en algún proyecto de fitorremediación en caso de algún derrame de hidrocarburos, ya que tiene la capacidad de establecerse de manera óptima en una buena parte del estado de Hidalgo. Se observa que, de acuerdo con el modelo de nicho ecológico, *P. vulgaris* puede establecerse de manera óptima a lo largo de todo el oleoducto que recorre el estado de norte a Sur. Es importante mencionar que en esta zona se encuentra la Reserva de la biósfera de la Barranca de Metztitlán, por lo que los resultados obtenidos en este estudio pueden ser importantes para elaborar planes de contingencia y mitigación en caso de alguna afectación en la región (Figura 6).

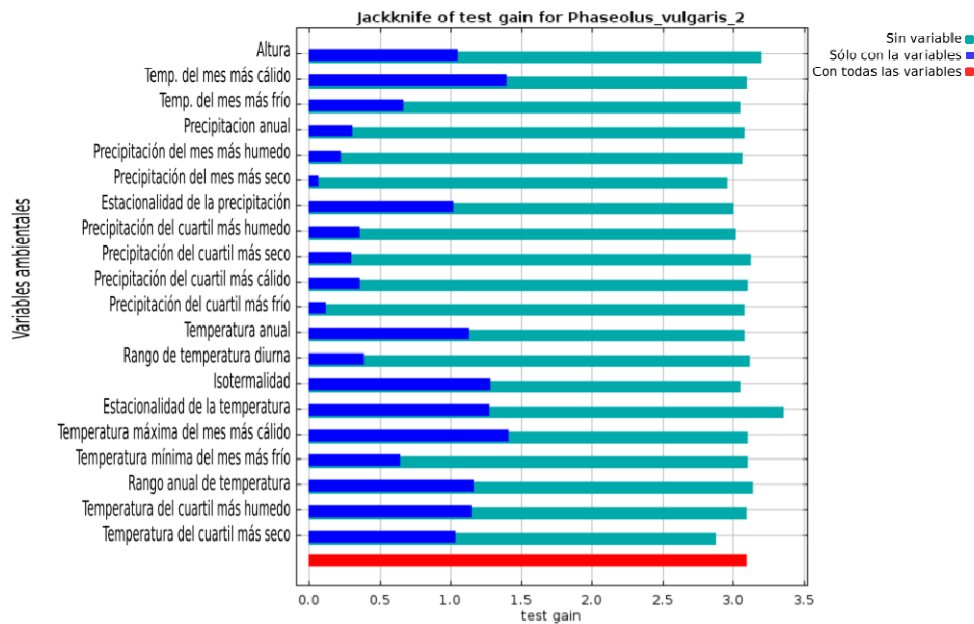


Fig. 4. Peso de las variables utilizadas en el modelo

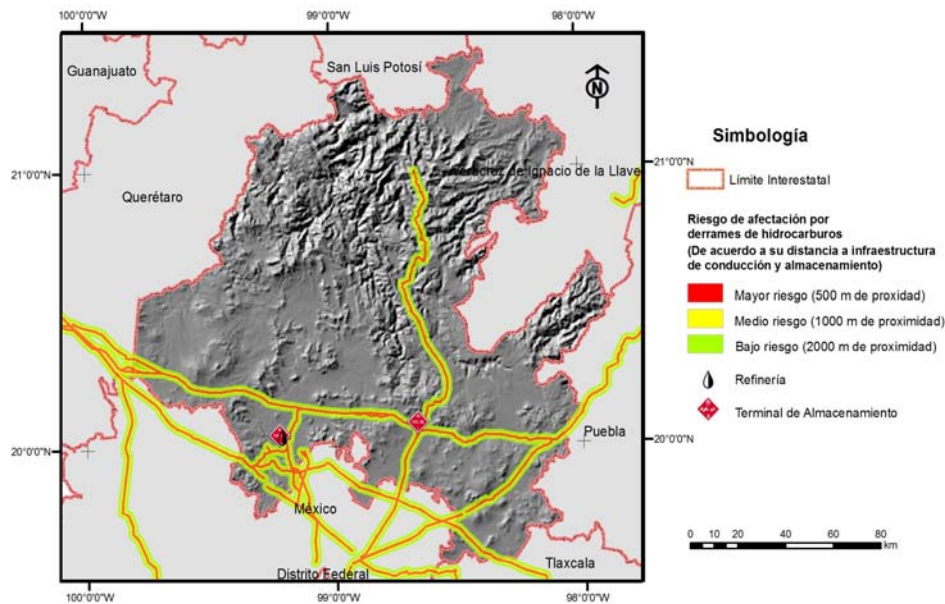


Fig. 5. Áreas con potencial de derrames de hidrocarburos en el estado de Hidalgo

Con respecto a los oleoductos ubicados el resto del valle del mezquital se puede observar que *P. vulgaris* sería una opción viable para utilizar en caso de un siniestro, ya que, de acuerdo con el modelo, es capaz de establecerse de manera óptima en esta región, que incluye una refinería y una terminal de almacenamiento. Sin embargo, en las zonas que corresponde a la región de la Comarca Minera y Valle de Tulancingo, por donde pasa un oleoducto y existe una terminal de almacenamiento, la especie no es capaz de establecerse adecuadamente, por lo que sería necesario buscar otras opciones en caso de un siniestro.

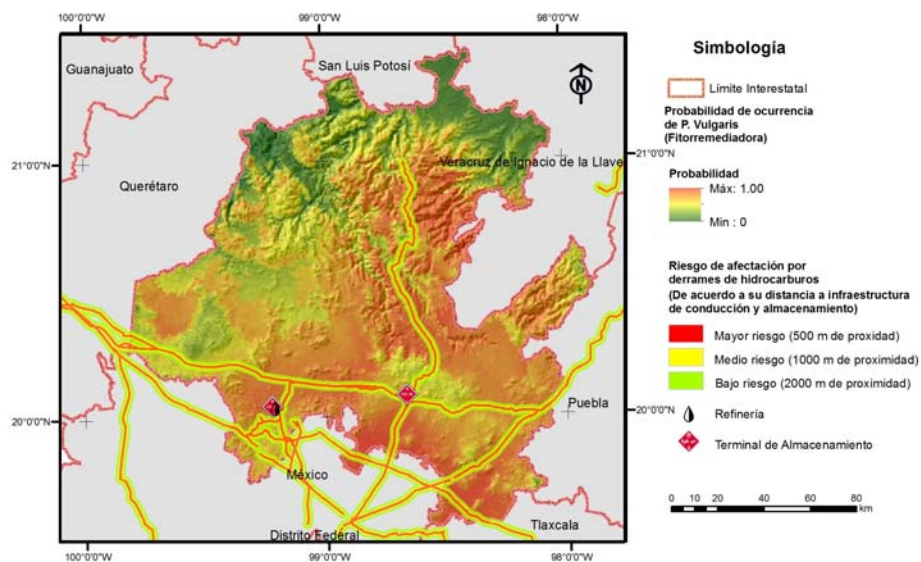


Fig. 6. Distribución potencial de *P. vulgaris* con respecto a las áreas con riesgo de derrame de hidrocarburos

IV. CONCLUSIONES

De acuerdo con el modelo de distribución potencial, *P. vulgaris* es capaz de establecerse de manera óptima en el centro, oriente y sur del estado de Hidalgo, ocupando un área de 6291.64 km² que equivale al 30.24 % de su extensión territorial. Mientras que el mapa de zonas con potencial de derrames de hidrocarburos muestra que el mayor riesgo estaría en la región sur. Por tanto, Las zonas de distribución potencial coinciden con las de mayor riesgo de derrames en el estado, por lo que *P. vulgaris*, de acuerdo con este modelo, sería una opción viable para utilizar en procesos de fitorremediación.

REFERENCIAS

- [1] F. Rivera Pineda *et al.*, “EFECTOS ECONÓMICOS POR SINIESTROS EN LA AGRICULTURA MEXICANA,” in *Estudios y Propuestas para el Medio Rural*, 1st ed., R. Martínez Ruiz, G. E. Rojo Martínez, B. Ramírez Valverde, and J. P. Juárez Sánchez, Eds. Montecillo, México: COLPOS, 2013, p. 200.
- [2] R. Iturbe, C. Flores, A. Castro, and L. G. Torres, “Sub-soil contamination due to oil spills in zones surrounding oil pipeline-pump stations and oil pipeline right-of-ways in Southwest-Mexico,” *Environ. Monit. Assess.*, vol. 133, no. 1–3, pp. 387–398, 2007, doi: 10.1007/s10661-006-9593-y.
- [3] A. M. Cantú *et al.*, “Comparación estacional del comportamiento de derrames de hidrocarburos en sitios ambientalmente sensibles INE/A1-011/2010,” México D.F., 2010.
- [4] N. Ruiz Rivera, J. M. Casado Izquierdo, and M. T. Sánchez Salazar, “Los Atlas de Riesgo municipales en México como instrumentos de ordenamiento territorial,” *Investig. Geogr.*, vol. 2015, no. 88, pp. 146–162, 2015, doi: 10.14350/rig.48326.
- [5] D. Tirado Torres, C. Romo Gómez, Y. Marmolejo Santillána, A. Palacios Romero, O. Acevedo Sandoval, and M. de la L. Hernández Flores, “Participación de Consorcios Microbianos en la Biodegradación de Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos,” in *Ecología y Medio Ambiente La labor investigadora e innovadora en México*, 1st ed., G. Chavira, S. W. Nava, and G. Quiroga, Eds. Cheyenne: Science Associated Editors, 2015, pp. 149–172.
- [6] C. Peña, A. Sanchez, J. R. R., C. Trejo, E. Cárdenas, and A. M., “Temperature and mechanical scarification on seed germination of ‘maguey’ (*Agave salmiana* Otto ex Salm-Dyck),” *Seed Sci. Technol.*, vol. 34, pp. 47–56, Apr. 2006, doi: 10.15258/sst.2006.34.1.06.
- [7] A. E. Delgadillo López, C. A. González Ramírez, F. Prieto García, J. R. Villagómez Ibarra, and O. Acevedo Sandoval, “Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación,” *Tropical and subtropical agroecosystems*, vol. 14, pp. 597–612, 2011, [Online]. Available: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-04622011000200002&nrm=iso.
- [8] E. Hernández Acosta, J. Enrique Rubiños Panta, and J. Alvarado López, *Restauración de suelos contaminados con hidrocarburos : Conceptos Básicos*, 1°. Estado de México: COLPOS, 2004.
- [9] K. Torres Delgado and T. Zuluaga Montoya, “Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos,” Universidad Nacional de Colombia, 2009.
- [10] M. A. Trujillo Toro and J. F. Ramírez Quirama, “Biorremediación en suelos contaminados con hidrocarburos en Colombia,” *Rev. Investig. Agrar. y Ambient.*, vol. 3, no. 2, pp. 37–62, 2012.
- [11] D. I. Loya del Angel, “Tecnologías para la restauración de suelos contaminados por hidrocarburos,” Universidad Veracruzana, 2013.
- [12] D. E. Steinfeld, S. A. Riley, K. M. Wilkinson, T. D. Landis, and L. E. Riley, “Roadside revegetation: an

- integrated approach to establishing native plants,” Vancouver, 2007.
- [13] J. M. Finch, M. J. Samways, T. R. Hill, S. E. Piper, and S. Taylor, “Application of predictive distribution modelling to invertebrates: Odonata in South Africa,” *Biodivers. Conserv.*, vol. 15, no. 13, pp. 4239–4251, 2006, doi: 10.1007/s10531-005-3577-z.
- [14] G. Cruz Cárdenas, J. L. Villaseñor, L. López Mata, E. Martínez Meyer, and E. Ortiz, “Selección de predictores ambientales para el modelado de la distribución de especies en Maxent,” *Rev. Chapingo, Ser. Ciencias For. y del Ambient.*, vol. 20, no. 2, pp. 187–201, 2014, doi: 10.5154/r.rchscfa.2013.09.034.
- [15] S. J. Phillips and M. Dudík, “Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation,” *Ecography (Cop.)*, vol. 31, no. 2, pp. 161–175, 2008.
- [16] N. Morales San Martín, “Modelos de distribución de especies : Software Maxent y sus aplicaciones en Conservación,” *Rev. Conserv. Ambient.*, vol. 2, no. 1, pp. 1–5, 2012.
- [17] GBIF, “GBIF Occurrence Download,” *GBIF.org*, 2016. <http://api.gbif.org/v1/occurrence/download/request/0001958-160509122628363.zip> (accessed May 05, 2016).
- [18] A. Palacios Romero, R. Rodríguez Laguna, M. de la L. Hernández Flores, E. Jiménez Muñoz, and D. Tirado Torres, “Distribución potencial de *Prosopis laevigata* (Humb. et Bonpl. ex Willd) M. C. Johnston basada en un modelo de nicho ecológico,” *Rev. Mex. Ciencias For.*, vol. 7, no. 34, pp. 35–46, 2016, [Online]. Available: <http://cienciasforestales.inifap.gob.mx/editorial/index.php/Forestales/article/view/4130>.
- [19] R. Ávila, R. Villavicencio, and J. A. Ruiz, “Distribución potencial de *Pinus herrerae* Martínez en el occidente del estado de Jalisco,” *Rev. Mex. Ciencias For.*, vol. 5, no. 24, pp. 92–109, 2014.
- [20] M. R. García Mateo, “Modelos predictivos de riqueza de diversidad vegetal. Comparación y Optimización de Métodos de Modelado Ecológico,” Universidad Complutense de Madrid, 2008.
- [21] S. Grimaz, S. Allen, J. Stewart, and G. Dolcetti, “Fast prediction of the evolution of oil penetration into the soil immediately after an accidental spillage for rapid-response purposes,” in *Proceeding of 3rd International Conference on Safety & Environment in Process Industry, CISAP-3, Rome (I)*, 2008, pp. 11–14.
- [22] J. C. Jiménez Galindo and J. A. Acosta Gallegos, “Caracterización de genotipos criollos de frijol Tepari (*Phaseolus acutifolius* A. Gray) y común (*Phaseolus vulgaris* L.) bajo temporal ,” *Revista mexicana de ciencias agrícolas* , vol. 3. scielomx , pp. 1565–1577, 2012.
- [23] J. L. Villaseñor Ríos and F. J. Espinosa García, *Catálogo de malezas de México*. México: Universidad Nacional Autónoma de México y Fondo de Cultura Económica, 1998.
- [24] A. Rueda Sanchez, J. A. Ruiz Corral, J. G. Flores Garnica, and E. Talavera Zuñiga, *Potencial productivo para 11 especies de pino en Jalisco*, 1st ed. Jalisco: INIFAP, 2006.
- [25] L. Cano Salinas, R. Rodríguez Laguna, J. R. Valdez Lazalde, O. A. Acevedo Sandoval, and R. I. Beltrán Hernández, “Detección del crecimiento urbano en el estado de Hidalgo mediante imágenes Landsat ,” *Investigaciones geográficas . scielomx* , p. 0, 2017.