

Recibido: 18/02/2019

Aceptado: 16/08/2019

Efecto de variables socio-ambientales en la distribución y riesgo potencial de Triatoma (*Hemiptera: Reduviidae*) en el Estado de Guanajuato, México.¹

Effect of Socio-Environmental variables in the distribution and potential risk Of Triatoma (Hemiptera: Reduviidae)

In The State Of Guanajuato, Mexico

Mónica Chico-Avelino¹

Resumen

La enfermedad de Chagas es causada por *Trypanosoma cruzi* y transmitida por insectos del género *Triatoma*. La distribución de estos últimos depende de factores ambientales, biológicos y sociales. La hipótesis que plantea esta investigación es la siguiente: la interacción de variables ambientales y sociales que reflejan las condiciones de rezago de la población humana, explican de manera más precisa el patrón de distribución de este vector y, en consecuencia, el riesgo epidemiológico de la enfermedad.

Objetivos. Con la finalidad de comprobar el efecto y contribución de variables socio-ambientales en la distribución e identificación de zonas de mayor riesgo potencial de *Triatoma* en el estado de Guanajuato, se evaluaron dos métodos que analizan los patrones de distribución, uno a escala global y otro a nivel local. **Material y métodos.** Los métodos utilizados son: el Modelo de Máxima Entropía (MaxEnt) y la Regresión Geográficamente Ponderada (GWR); como variables socio-ambientales se consideraron: índice de desarrollo humano, índice de rezago social, población con una carencia social, uso de suelo y vegetación, elevación, pendiente, evaporación y temperatura. Como ocurrencias se utilizaron datos publicados por López-Cárdenas et al., 2005. **Resultados.** Mediante los dos métodos se observó que las variables socioeconómicas explican en más de 50 % la predicción de la distribución de *Triatoma*. Igualmente, que el índice de rezago social es la variable que más contribuye a la explicación de esta distribución, con un porcentaje de estimación de 34.3 % y 39.08 % para MaxEnt y GWR, respectivamente. A partir de dichos modelos se identificó que las áreas de mayor riesgo potencial se concentran al Noreste del estado, con una mayor entropía en el municipio de Victoria, y con mayor nivel de riesgo en Tierra blanca. **Conclusiones.** Con base en estos resultados se comprueba que las variables sociales tienen un fuerte poder explicativo en la predicción de la distribución y riesgo potencial de *Triatoma* en Guanajuato, de manera que la elección de

¹ Maestra en Geografía Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica y Análisis Espacial. Facultad de Estudios Superiores Iztacala – Universidad Nacional Autónoma de México. Avenida de los Barrios Número 1, Colonia Los Reyes Iztacala, Tlalnepantla, Estado de México, C.P. 54090.

m_chico@campus.itzacala.unam.mx

Sin conflictos de interés

las variables que contextualicen con mayor profundidad la historia natural de Triatoma y el entorno social del huésped, puede resultar más crítica que el propio modelo.

Palabras clave: Enfermedad de Chagas, Triatoma, Sistemas de información geográfica, Modelos de distribución potencial, MaxEnt, GWR.

Abstract

Introduction. Chagas disease is caused by *Trypanosoma cruzi* and transmitted by insects of the *Triatoma* genus. The distribution of Triatoma is explained by environmental, biological and social factors. The hypothesis that this research raises is this: the interaction of environmental and social variables that reflect the lag conditions of the human population explain more precisely the pattern of distribution of this vector and, consequently, the epidemiological risk of the disease. **Objectives.** So as to verify the effect and contribution of socio-environmental variables in the distribution and identification of areas of greatest potential risk of Triatoma in the state of Guanajuato, two methods that analyze the distribution patterns were evaluated: one on a global scale and another locally. **Materials and methods.** The methods used are the Maximum Entropy Model (MaxEnt) and the Geographically Weighted Regression (GWR), as socio-environmental variables the following were considered: human development index, social lag index, population with a social deficiency, land use and vegetation, elevation and slope, evaporation and temperature. As occurrences, data published by López-Cárdenas et al. 2005 was used. **Results.** It was observed with the two methods, that the socioeconomic variables explain in more than 50% the prediction of the distribution of Triatoma; and that the social lag index is the variable that most contributes to the explanation of this distribution, with an estimated percentage of 34.3% and 39.08% for MaxEnt and GWR respectively. From these models it was identified that the areas of greatest potential risk are concentrated in the northeast side of the state, with a higher entropy was Victoria Country and with higher level of risk is Tierra blanca. **Conclusions.** Based on these results, it is verified that the social variables have a strong explanatory power in the prediction of the distribution and potential risk of the Triatoma disease in Guanajuato. Thus, the choice of variables that contextualize Triatoma's natural history and the host's social environment in greater depth may be more critical than the model itself.

Keywords: Chagas disease, Triatoma, Geographic Information System, Potential distribution models, MaxEnt, GWR.

Introducción

La enfermedad de Chagas es causada por *Trypanosoma cruzi* y se transmite por insectos hematófagos de la familia Triatominae (*Hemiptera: Reduviidae*), y se considera una problemática multidimensional íntimamente relacionada a la pobreza estructural (Arteaga y Ortega, 2010). Para que este padecimiento surja en un lugar determinado, es necesario que en él concurren múltiples factores ambientales y biológicos; sin embargo, los más importantes son los de carácter social directamente relacionados con la pobreza, la educación sanitaria, el hacinamiento y las migraciones, entre otros (Fernández, 2003). Esas condiciones sociales propician la colonización y dispersión del vector (Salazar-Schettino et al., 2016).

La importancia de los aspectos sociales y culturales vinculados a la problemática del Chagas ha sido ampliamente reconocida (Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas [CONICET], 2015). El denominador común de esta enfermedad está directamente relacionado con aspectos sociales, culturales y económicos; es decir, se trata de comunidades marginales, en donde las condiciones precarias de vivienda y la falta de oportunidades son la regla común (Ribera, 1985, citado por CONICET, 2015, p. 75). Su presencia se asocia a condiciones materiales de pobreza, escasez de información y falta de acceso a servicios sanitarios básicos, por lo que este padecimiento se ha convertido en un símbolo de las profundas inequidades que arrastra América Latina (Zabala, 2009).

México es un país endémico para la enfermedad de Chagas, en donde dos terceras partes del territorio pueden ser consideradas en riesgo de

transmisión vectorial; es decir que 1, 100,000 individuos podrían estar infectados con *T. cruzi*, y 29, 500,000 en riesgo de contraer la infección (Salazar-Schettino et al., 2016).

En el territorio mexicano se han documentado 32 vectores de *T. cruzi*, siendo el género más común el *Triatoma* con 19 especies de amplia distribución (Salazar-Schettino et al., 2007). Este género es considerado un vector importante dentro del país, reportado en todos los estados de México (Cruz-Reyes y Pickering-López, 2006). Por su parte, en el estado de Guanajuato, se ha estimado que 3, 755,380 individuos se encuentran en riesgo de transmisión por vectores, con una incidencia de 3,500 casos nuevos por año (López-Cárdenas et al., 2005). Sin embargo, a pesar de tratarse de un padecimiento importante en México debido a su alta incidencia en diversos estados, no existe una preocupación nacional por identificar las condiciones de la población infectada, así como las características de las zonas de riesgo.

Un paso necesario en la comprensión y atención de la enfermedad de Chagas en México y la estratificación del riesgo de transmisión, es el desarrollo de información detallada de la distribución de *Triatominae* en el país (Ramsey et al., 2015). Para contribuir al conocimiento de esta distribución se ha utilizado el enfoque de la modelación del nicho ecológico.

Asociado a este enfoque, se encuentran los modelos de distribución de potencial, mismos que se basan de diversos algoritmos para obtener escenarios de idoneidad para la distribución de los taxones, a partir de datos de distribución conocida y variables explicativas. Se trata de herramientas potenciales para el análisis de los patrones espaciales de presencia y del riesgo a la exposición de las enfermedades. Estos modelos pueden identificar áreas adecuadas en donde los taxones pueden mantener sus poblaciones (Soberón y Peterson, 2005), basándose en datos

de ocurrencia y de condiciones ambientales como el clima y la topografía (Ramsey et al., 2015).

En este sentido, se han desarrollado diversas investigaciones que han evaluado la distribución de Triatoma a través de predicciones basadas en modelos de nicho ecológico; algunos de ellos han demostrado que las características climáticas dan forma a la distribución geográfica y riqueza de especies de triatomíos (Diniz et al., 2013; Leite et al., 2011). Otros más, han evaluado las relaciones de Triatoma con uno de sus huéspedes (Neotema), a partir de modelados de nicho ecológico, encontrando que existe una interacción, ya que la distribución geográfica de los grupos coincide (Peterson et al., 2002.). Uno de los esfuerzos en sistematizar la información de *Triatominae* en México es el trabajo de Ramsey et al., 2015, que desarrolló un atlas de triatomíos mexicanos analizando sus asociaciones geográficas con *T. cruzi*, la demografía humana y la modificación del paisaje a partir de la comparación de modelos de nicho ecológico de diferentes especies. El estudio concluye que esos vectores se han urbanizado en la mayoría de las regiones, lo que demuestra una alta tolerancia a los hábitats modificados por el hombre. En el caso particular de Guanajuato, López-Cárdenas et al., 2005, construyeron modelos de nicho ecológico para obtener predicciones de la distribución de cinco especies vectores de Chagas en la entidad, reportando que *T. barberi* representa el mayor riesgo de transmisión de la enfermedad en el estado.

Si bien la distribución de Triatoma en México se ha evaluado con modelos de nicho ecológico, los proyectos se han enfocado en predicciones con variables climáticas y topográficas, a pesar de que se tiene conocimiento de que los patrones de distribución de triatomíos están fuertemente relacionados con las características socioeconómicas de la población humana. Es por ello que esta investigación

plantea como hipótesis que la interacción de variables ambientales y sociales que reflejan las condiciones de rezago social de la población humana, explican de manera más precisa el patrón de distribución de este vector y, en consecuencia, el riesgo potencial epidemiológico de la enfermedad de Chagas.

De modo que en el presente trabajo se pretende comprobar el efecto y la contribución de variables socio-ambientales en la distribución e identificación de las zonas de mayor riesgo potencial de Triatoma en el estado de Guanajuato, evaluando dos métodos que analizan los patrones de distribución, uno a escala global y otro a nivel local, con la finalidad de probar la hipótesis formulada.

Materiales y métodos

El análisis se realizó a partir de la depuración de los datos publicados en López-Cárdenas et al., 2005, resultando en una base de datos georreferenciada de 254 registros de presencia (ocurrencias) del género Triatoma para el estado de Guanajuato. Esta base de datos incluyó a las especies *T. barberi*, *T. dimidiata*, *T. mexicana* y *T. pallidipennis*, con una escala temporal del año 2000 al 2002. Las ocurrencias se obtuvieron de 43 comunidades visitadas por personal de promoción de la salud y técnicos de vectores, como parte de las actividades de prevención de la enfermedad de Chagas en la entidad (López-Cárdenas et al., 2005).

En el modelo de distribución potencial se incluyó un juego de ocho variables, de las cuales cuatro corresponden a factores socioeconómicos: índice de desarrollo humano, índice de rezago social, porcentaje de población con una carencia social, y uso de suelo y vegetación; las cuatro variables ambientales (geofísicas) consistieron en elevación, pendiente, evaporación normal anual, y temperatura media anual. Estas referencias geográficas se

obtuvieron de los servidores de datos abiertos de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), y el Sistema Meteorológico Nacional (SMN-CNA). Debido a la disponibilidad de la cartografía se trabajó a una escala 1: 50 000 y 1:250 000, con una resolución espacial de 15 m. Toda la información se procesó mediante un Sistema de Referencia de Coordenadas UTM WGS84 14N.

Los dos métodos que se emplearon para evaluar las variables socio-ambientales anteriormente mencionadas, fueron MaxEnt y la Regresión Geográficamente Ponderada (GWR). Para medir el rendimiento del análisis, se efectuó la prueba de ROC (Receiver Operating Characteristic) y el AUC (Area Under the Curve); estas pruebas estiman que los datos incluidos en el modelo no son aleatorios, sino que responden a un patrón espacial, y que pueden ser explicados con las variables elegidas para el análisis.

En el caso de MaxEnt, éste estima una distribución de probabilidad mediante la búsqueda de la máxima entropía (idoneidad), sujeta a un conjunto de restricciones que representan la información parcial acerca de la distribución conocida. En MaxEnt los píxeles del área de estudio constituyen el espacio en el que se define la distribución de probabilidad. Los píxeles con datos de ocurrencias conforman los puntos de muestra, y las características son las variables climáticas, altitud, tipo de vegetación, u otras (Phillips et al., 2006). Los resultados de MaxEnt arrojan valores con una escala de 0 a 1, siendo 0 para aquellas zonas con menor entropía, y 1 para la máxima entropía entre las variables elegidas por el especialista y las ocurrencias.

Con base en lo anterior, los valores obtenidos con MaxEnt se reclasificaron para delimitar

las zonas con mayor riesgo potencial, tomando como criterio que los sitios con valores de cero tienen una entropía prácticamente nula, y que conforme se acercan a la unidad ésta aumenta, por lo que el riesgo epidemiológico por distribución potencial de los vectores se incrementa. De esta forma, se definieron cuatro cortes de los valores de entropía, utilizando el método clasificación de intervalos iguales, resultando en cuatro categorías de riesgo potencial: bajo (0.000086 – 0.24), moderado (0.25 – 0.48), alto (0.49 – 0.72), y muy alto (0.73 – 0.965).

Así mismo, con el objetivo de conocer la contribución de las variables al patrón de distribución potencial de Triatoma, se obtuvo el análisis Jackknife, que crea un conjunto de expresiones en donde se evalúa el modelo con diferentes iteraciones examinando las variables en conjunto, la variable de forma individual, y la predicción sin la variable.

Mientras MaxEnt analiza las variables utilizadas como globales, se puede preguntar también si, y cómo, las relaciones entre las presencias de Triatoma y las ocho variables incluidas en el modelo varían a nivel local. Por ello, para analizar y visualizar el efecto y la contribución de las variables a nivel local, se examinaron los datos con el método de GWR ejecutado con ArcMap 10.1, utilizando como unidades básicas las áreas geoestadísticas municipales.

GWR es una forma local de regresión lineal que se utiliza para modelar las relaciones que varían espacialmente; es decir, se trata de una técnica de regresión espacial que considerando variables dependientes (Y) y explicativas (X)-, permite modelar la variación espacial de las variables explicativas (Fotheringham et al., 2002), bajo el siguiente modelo: $Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots \beta_n X_n + \varepsilon$. Donde: β : coeficientes que expresan cuánto aporta cada variable explicativa (X); ε : error residual.

Resultados

En primer lugar, se obtuvo un valor de AUC de 0.873, lo cual indica que el modelo presenta un buen rendimiento y que los datos no son aleatorios, por lo que se pueden explicar con las variables incluidas en la predicción, como lo menciona Phillips et al., 2006. Un valor de AUC cercano a 0.5 indica que la predicción no es mejor que el azar, mientras que valores cercanos a 1 indican un mejor desempeño del modelo.

Por su parte, los resultados que arrojó MaxEnt muestran una probabilidad de distribución que va de 0.000086 (zonas con menor idoneidad para Triatoma) hasta valores de 0.965 (zonas con máxima idoneidad). (Figura 1).

Los sitios que tienen menor valor de idoneidad se centralizan en la porción noroeste y centro del estado, mientras que las áreas con mayor idoneidad (mayor riesgo potencial) se concentran en la parte Noreste de la entidad, en la región conocida como Sierra Gorda (Ver A en la Figura 1).

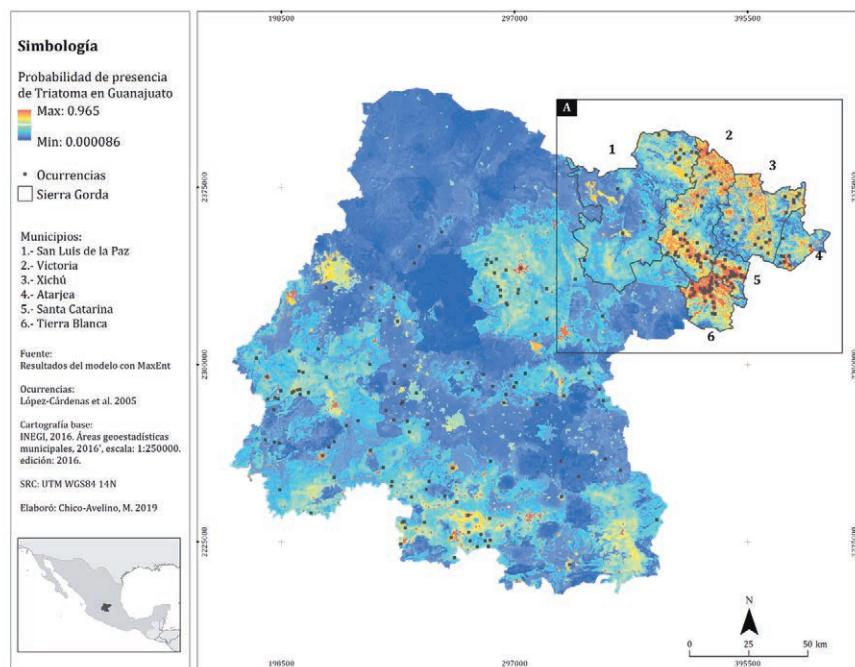
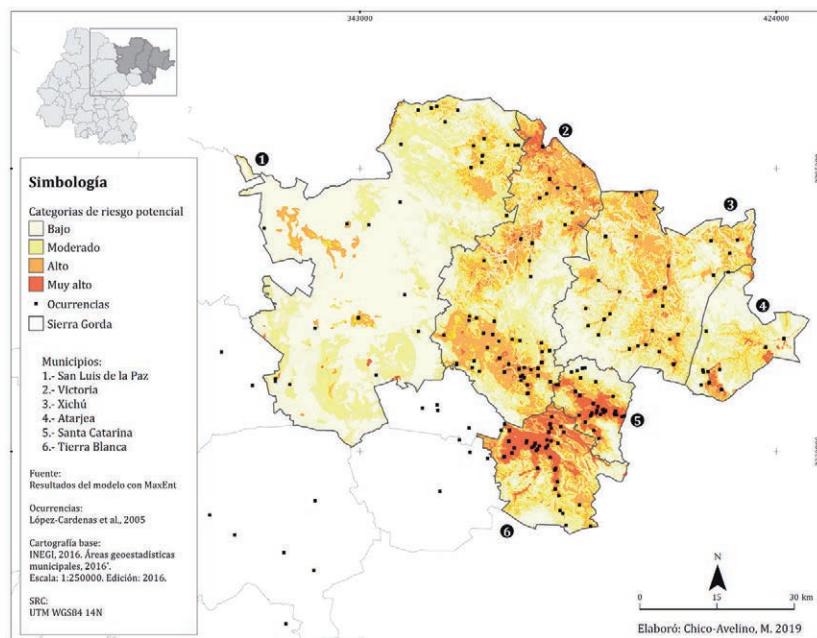


Figura 1. Distribución potencial de Triatoma en el estado de Guanajuato, México. A) Área con mayor probabilidad de presencia. Elaboración propia.

Estas zonas que presentan los valores más altos se consideran como sitios de riesgo potencial, debido a que cumplen con las condiciones para la presencia de Triatoma, tomando como base las características del modelo diseñado. Estas condiciones, según los resultados de MaxEnt, son: índice de rezago social alto y muy alto; índice de desarrollo humano bajo y medio; municipios con entre 90 y 100 % de población con una carencia social; usos de suelo urbanos, agrícola, y vegetación secundaria; un gradiente altitudinal de 500 a 900 msnm; pendientes de 5 a 10 °; temperatura media anual de 20 a 21°C, y evaporación normal anual de 1200 a 1300 mm.

En el caso de la zona identificada con mayor riesgo potencial que corresponde a la Sierra Gorda de Guanajuato, ésta comprende a los municipios de Atarjea, San Luis de la Paz, Santa Catarina, Victoria y Xichú (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas [CONANP], 2005), así como a Tierra Blanca. (Figura 2).

Como se observa en la Figura 2, uno de los municipios con mayor riesgo potencial es Tierra Blanca, pues la mayor parte de su superficie se caracteriza por un riesgo muy alto y una fuerte presencia de vectores (ocurrencias). Por otra parte, el municipio de San Luis de la Paz es el que presenta menor riesgo potencial dentro de esta zona de la Sierra Gorda.



Un caso particular es el municipio de Victoria, que presentó los mayores valores de entropía con un intervalo que oscila entre 0.003 y 0.965; es decir, se trata del municipio que representa los máximos valores de idoneidad del modelo global. Sin embargo, a pesar de esta condición, dentro de sus límites mostró que 36.35 % de su territorio presenta un riesgo alto, seguido de un riesgo moderado con 31.38%, y únicamente 3.49% con un riesgo muy alto (Figura 3A).

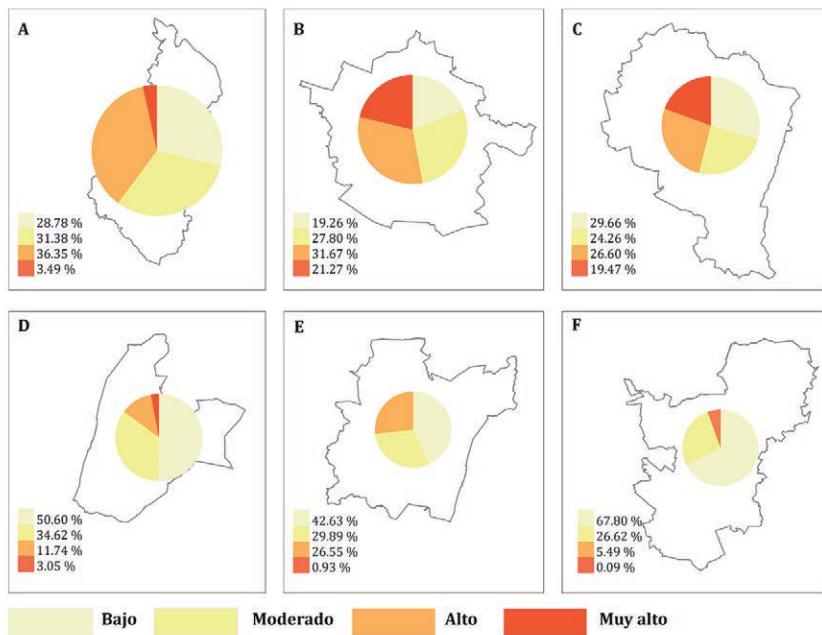


Figura 3. Porcentaje de superficie por categoría de bajo (0.000086 – 0.24), moderado (0.25 – 0.48), alto (0.49 – 0.72) y muy alto (0.73 – 0.965). A) Victoria, B) Tierra Blanca, C) Santa Catarina, D) Atarjea, E) Xichú y F) San Luis de la Paz. Elaboración propia.

Como hemos mencionado, el municipio con mayor nivel de riesgo potencial por probabilidad de presencia de *Triatoma* es Tierra Blanca; ello se debe a que 31.67 % de su territorio total presenta un riesgo alto, y 21.27 % un riesgo muy alto, resultando así el municipio que evidencia la mayor superficie con riesgo muy alto, a pesar de que sus valores de entropía van de 0.002 a 0.92 (Figura 3B). En el caso de Santa Catarina, esta es la segunda demarcación con mayor riesgo, en donde 26.6 % del territorio cuenta con riesgo alto, y 19.4 % muy alto, con valores de entropía de 0.004 a 0.91 (Figura 3C).

Por su parte, el municipio de Atarjea mostró valores de entropía de 0.002 a 0.94, con un porcentaje territorial de 11.74 % y 3.05 % de riesgo alto y muy alto, respectivamente (Figura 3D). Adicionalmente, Xichú tiene valores de entropía que van de 0.003 a 0.89, con un riesgo alto que comprende 26.5 % de su superficie,

y 0.93 % de riesgo muy alto (Figura 3E). Finalmente, el municipio dentro de la Sierra Gorda que muestra el menor nivel de riesgo potencial es San Luis de la Paz, con valores de entropía de 0.001 a 0.84, con una proporción territorial de 5.49 % con riesgo alto, y de 0.09 % con riesgo muy alto (Figura 3F).

Por lo que se refiere a las variables, mediante MaxEnt se obtuvieron los valores de contribución que permiten identificar como éstas ayudan a predecir la distribución potencial, y en qué medida favorecen al patrón de distribución; en este caso, resulta que las variables de mayor peso para modelar la presencia de Triatoma son: el índice de rezago social, el uso de suelo y vegetación, y la elevación y pendiente. En conjunto, estas cuatro variables contribuyen en 83 % en la predicción de distribución potencial del vector. Los datos de porcentaje de contribución de las ocho variables se muestran en la Tabla 1.

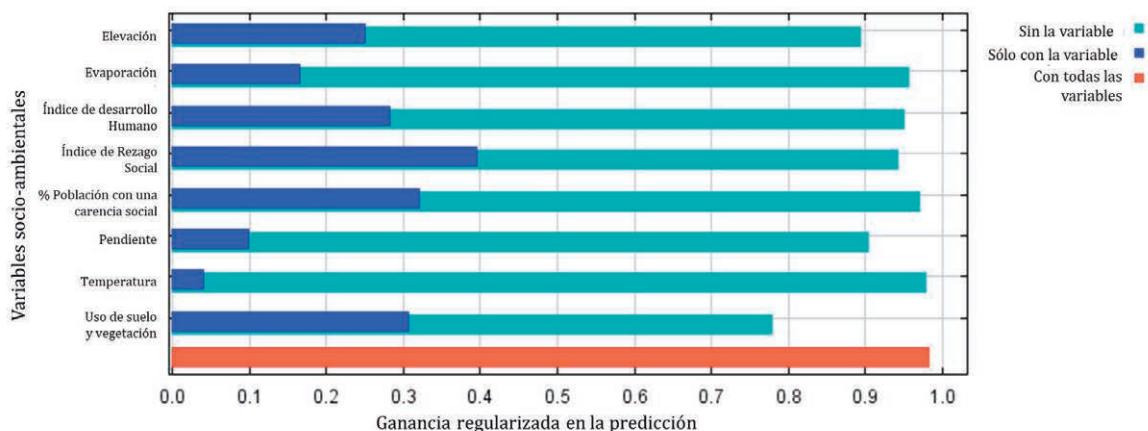
Tabla 1. Muestra los porcentajes de contribución de las ocho variables, obtenidos del modelo con MaxEnt. * Variables con mayor contribución.

Variable	Porcentaje de contribución
Índice de rezago social	34.3 *
Uso de suelo y vegetación	22.8 *
Elevación	13.6 *
Pendiente	12.3 *
Población con una carencia social	5.8
Evaporación normal anual	5.5
Índice de desarrollo humano	5.2
Temperatura media anual	0.5

En el caso de los valores de permutación de importancia para las variables, nuevamente se observó que el índice de rezago social es la que tiene mayor efecto en la estimación de zonas de riesgo potencial con un valor de 15.7 %, seguido del índice de desarrollo humano (14.8 %) y del porcentaje de la población con una carencia social (8.7 %). Es decir, la variable que mejor explica el patrón de distribución es el índice de rezago social; si se diseñara el modelo sólo con esta variable y con las ocurrencias, se obtendría una predicción de idoneidad de 0.4 como se refleja en el análisis Jackknife (Figura 4 – sólo con la variable).

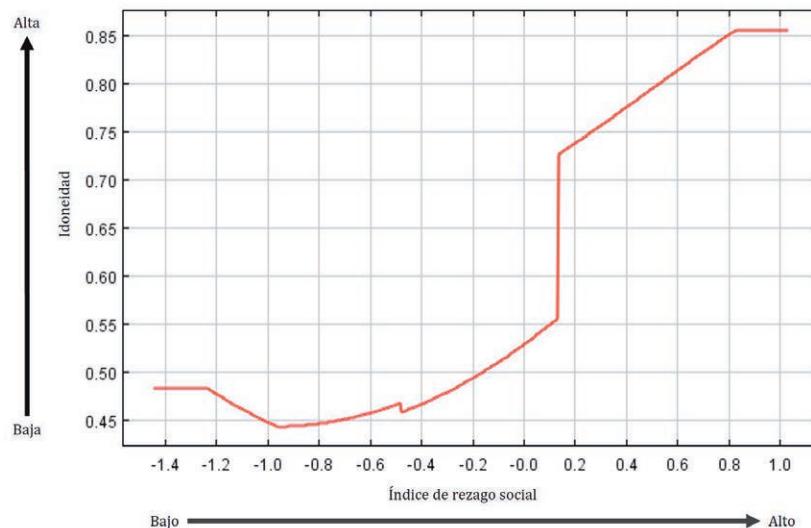
La variable con mayor información que no está presente en las otras variables es uso de suelo y vegetación (22.5 %), seguida de la elevación (17.3%), ya que al eliminarlas del modelo los valores de idoneidad disminuirían a 0.3 y a 0.25 respectivamente (Figura 4 - *sin la variable*). Como se puede observar, las variables socioeconómicas ayudan a explicar en mayor medida la distribución potencial de Triatoma en el estado de Guanajuato, debido a que en conjunto explican el 61.7 % la predicción con MaxEnt, siendo aquella la que en este caso explica menos la temperatura media anual con un valor de 1.7 % (Figura 4).

Figura 4. Importancia y aporte de cada variable en el modelo de distribución y riesgo potencial de Triatoma de acuerdo con la prueba de Jackknife.



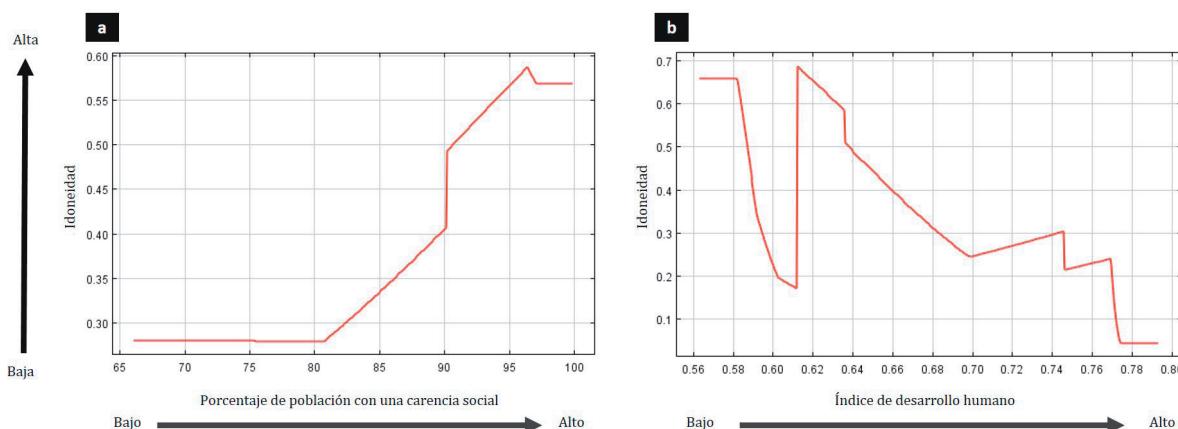
La Figura 5 expresa que la relación entre Triatoma y el índice de rezago social es positiva, es decir, que mientras más alto sea el índice de rezago social de la población (mayor vulnerabilidad social) la probabilidad de presencia de Triatoma incrementa por lo tanto el riesgo epidemiológico.

Figura 5.- Respuesta de Triatoma a la variable índice de rezago social, que muestra la relación positiva de la vulnerabilidad social y la distribución potencial de Triatoma. Elaboración propia.



En la Figura 6 se muestra una relación similar entre la distribución potencial de Triatoma y las condiciones de vulnerabilidad social, ya que las zonas de idoneidad se ven favorecidas cuando se incrementa el porcentaje de población con una carencia social (Figura 6a) expresando una relación positiva. En contraste, cuando el índice de desarrollo humano se incrementa, las zonas de idoneidad disminuyen, es decir, cuando las condiciones de calidad de vida se incrementan, la probabilidad de distribución del taxón disminuye (Figura 6b).

Figura 6.- Respuesta de Triatoma a variables sociales. A) Relación de la distribución al porcentaje de población con una carencia social. B) Relación del índice de desarrollo humano con la distribución del vector. Elaboración propia.



En tanto a la variable con mayor importancia, se observó una afinidad a ciertos usos de suelo y coberturas vegetales, que refleja que la presencia de estos vectores se asocia principalmente a los asentamientos humanos, así como a coberturas que expresan la modificación de la estructura y composición de la vegetación como es el caso de la agricultura, vegetación secundaria de bosque de Pino-Encino y de selva baja caducifolia (Figura 7).

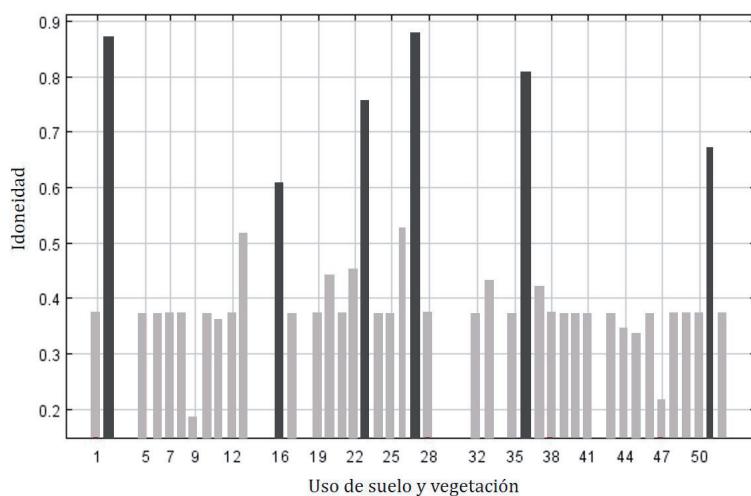


Figura 7.- Respuesta de Triatoma a los usos de suelo y vegetación que muestra la relación de la distribución del vector con las coberturas de origen antrópico. 2. Asentamientos humanos; 16. Mezquital xerófilo; 23. Agricultura de riego; 27. Agricultura de temporal; 36. Vegetación secundaria de Pino-Encino; 51. Vegetación secundaria de selva baja caducifolia. Elaboración propia.

Con el objetivo de verificar el efecto y la contribución de las variables frente a la distribución de Triatoma obtenidos con MaxEnt, éstas se compararon con los valores de GWR; para ello, se calcularon en primer lugar los mínimos cuadrados ordinarios (OLS) para el modelo global que mostró una R^2 ajustada de 0.74, lo que indica que la predicción explica 74 % de las variaciones de la distribución de Triatoma a nivel global. Posteriormente, se calcularon los OLS para cada una de las variables.

Confirmando la respuesta principal de MaxEnt, el índice de rezago social es la variable que más explica la distribución potencial de Triatoma, en este caso en un 39.08 %, siendo un predictor fuerte sobre todo en el Noreste de Guanajuato. La siguiente variable más explicativa es el índice de desarrollo humano con 11.85 %; la tercera variable en importancia para la GWR es el uso de suelo y vegetación, que permite explicar en un 4.29 % el modelo. Esta respuesta concuerda con los resultados de importancia de MaxEnt (Figura 4); es decir, a través de los dos métodos analizados, las variables socioeconómicas explican en más de 50 % la predicción de la distribución de triatominos en Guanajuato.

Sin embargo, es importante mencionar que los OLS señalan una posible redundancia entre el índice de rezago social y el índice de desarrollo humano, debido a que este último mostró un factor alto de inflación de la varianza (VIF) de 4.35 (Tabla 2). Estos valores altos de VIF indican que ambas variables podrían estar proporcionando la misma información, lo cual se relaciona con los resultados de la prueba de Jackknife de la Figura 4, así como con los valores bajos de contribución del índice de desarrollo humano (Tabla 1).

Tabla 2. Muestra los valores explicativos y el factor de inflación de la varianza (VIF) de cada variable resultado de la GWR. *Valor que indica redundancia de la variable.

Variable	Porcentaje de explicación	VIF
Índice de rezago social	39.08	4.163613*
Índice de desarrollo humano	11.85	4.359816*
Población con una carencia social	2.12	1.120454
Uso de suelo y vegetación	4.29	1.268517
Pendiente	2.88	1.544538
Elevación	1.66	1.73153
Evaporación normal anual	2.02	1.476509
Temperatura media anual	0.27	1.196821

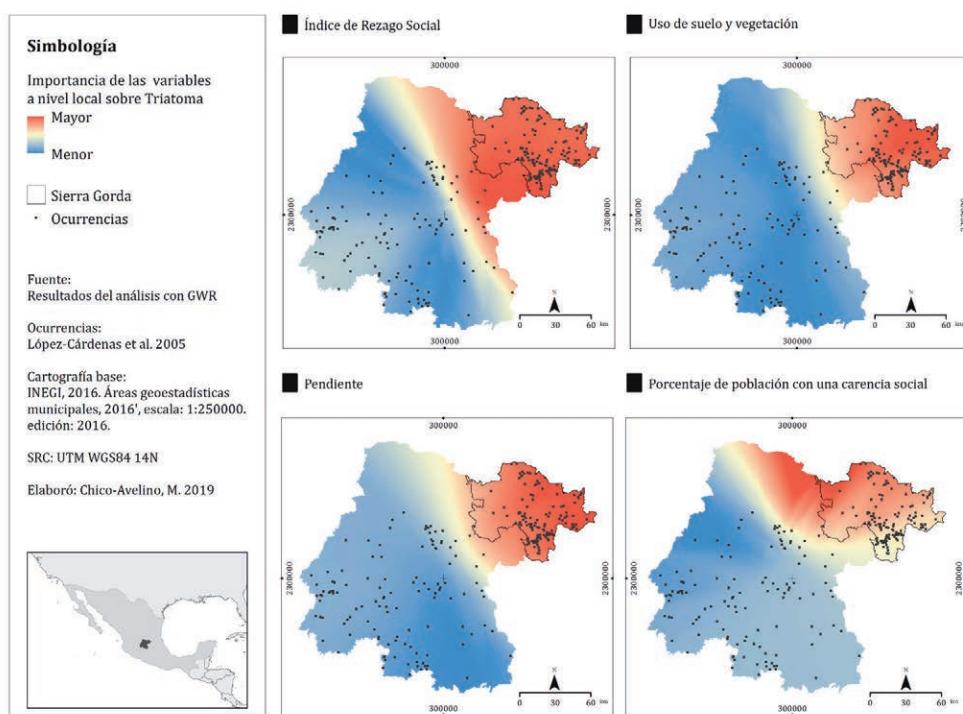
Por lo tanto, se podría decir que el índice de desarrollo humano constituye una variable importante pero no contribuye en gran medida en la predicción; lo anterior puede deberse a que ésta cuenta la misma “historia” que el índice de rezago social en el modelo. Por esta razón no fue posible obtener la cartografía de GWR del índice de desarrollo humano.

En este caso, la variable que menos ilustra, según los resultados de GWR, es la temperatura media anual, ya que explica únicamente 0.27 %, lo cual reafirma los resultados de MaxEnt (Figura 4). El resto de los valores se muestran en la Tabla 2.

Una vez identificadas las variables y su efecto en la determinación del patrón de distribución de *Triatoma* a nivel global, se realizó el análisis para saber si el efecto de las variables más explicativas es constante en todo el territorio o no; es decir, una evaluación a nivel local.

Se encontró que el efecto se concentra en el Noreste del estado (Figura 8). Estos datos empatan con la cartografía de distribución potencial con MaxEnt, en donde se observa que las zonas de mayor nivel riesgo potencial por presencia de *Triatoma* se concentran en la porción Noreste en la región de la Sierra Gorda (Figuras 1 y 2), posicionándose una vez más como la zona de mayor nivel de riesgo por presencia del vector.

Figura 8. Importancia de las variables más explicativas como predictores a nivel local para la presencia de *Triatoma* en Guanajuato, con GWR.



Discusión

Los resultados obtenidos de la AUC en la predicción con MaxEnt (0. 873) coinciden con los AUC reportados por Parra-Henao et al., 2016, que modelaron cuatro especies de Triatomínos obteniendo un promedio de 0.88 para dicho valor, lo que nos indica que las variables seleccionadas para el análisis son adecuadas para explicar el patrón de distribución potencial de Triatoma en el estado de Guanajuato, incluso al incluir variables socioeconómicas en la predicción.

El patrón de distribución potencial se encuentra relacionado con los patrones espaciales de las variables sociales más explicativas dentro del modelo, que son el índice de rezago social y el índice de desarrollo humano, lo que explica por qué las variables sociales representan un fuerte predictor en el análisis.

En la Figura 9 se muestra la relación de ambas variables en el estado de Guanajuato, y se observa que en la zona central del estado donde la probabilidad de distribución de Triatoma es baja, hay un índice de rezago social muy bajo y un índice de desarrollo humano alto, por lo que son áreas con menor vulnerabilidad social, mientras que en donde se concentra la probabilidad de distribución alta (mayor nivel de riesgo potencial), existe una relación alto, muy bajo y medio-bajo entre el índice de rezago social y el índice de desarrollo humano; es decir, son áreas con menor calidad de vida. A ello se puede atribuir que el riesgo potencial se concentre en la zona Noreste del estado.

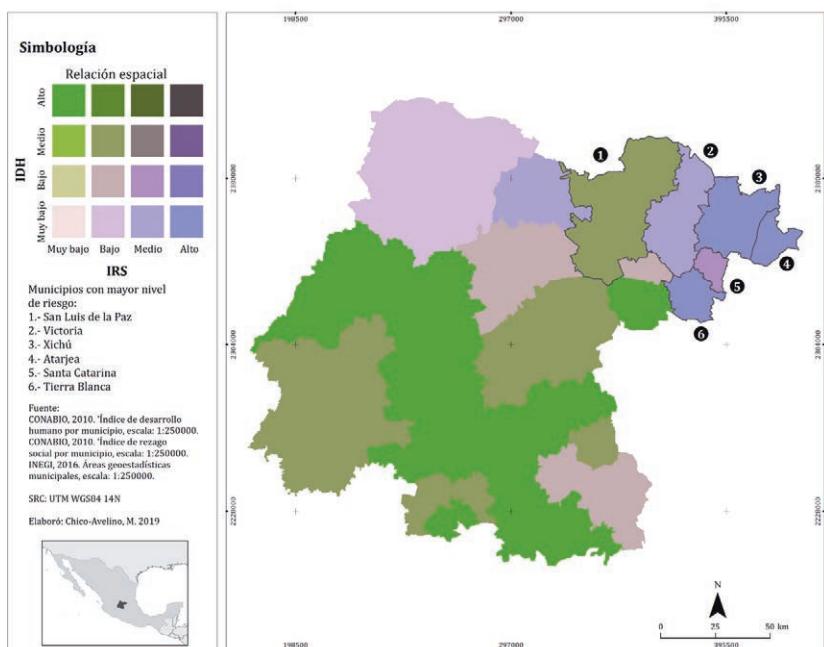


Figura 9. Relación espacial del índice de rezago social y el índice de desarrollo humano en el estado de Guanajuato. Elaboración propia.

De los 46 municipios que conforman el estado de Guanajuato, los únicos tres que presentan un grado de rezago social alto son Atarjea, Tierra Blanca y Xichú, mientras que Santa Catarina y Victoria muestran un grado de marginación medio. Por su parte, San Luis de la Paz presenta un grado de marginación bajo (Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social [CONEVAL], 2018).

Estas características socioeconómicas se relacionan con su riesgo potencial, identificando así una relación entre el nivel de riesgo frente a Triatoma con la vulnerabilidad social de esos municipios, lo cual podría estar asociado con los indicadores que toma en cuenta esta variable, a saber: rezago educativo; acceso a los servicios de salud; acceso a los servicios básicos de calidad, y espacios en la vivienda y activos en el hogar, y como mencionan Arteaga y Ortega, 2010, la enfermedad de Chagas es un padecimiento socioeconómico que afecta a poblaciones de escasos recursos, con viviendas precarias, y servicios de salud descentralizados.

De igual manera, estos resultados concuerdan con lo reportado por López-Cárdenas et al., 2005, que identificaron una tendencia general a índices de dispersión potenciales más altos en donde estaban presentes *T. mexicana* o *T. barberi* en los municipios de Atarjea, Santa Catarina, Tierra Blanca, Victoria y Xichú. Sin embargo, ello puede deberse también al esfuerzo de recolecta, ya que se efectuó un mayor contacto con las pequeñas comunidades rurales aisladas y, por lo tanto, se obtuvo mayor información de Xichú, Victoria y Santa Catarina (López-Cárdenas et al., 2005).

En el caso particular del municipio de Victoria, como se mencionó, es el que cuenta con los valores de máxima entropía (mayor idoneidad) en el modelo. Sin embargo, únicamente 3.49 % de su territorio presentó un riesgo muy alto, lo

cual puede relacionarse con el índice de rezago social que para esta entidad es medio; es decir, es muy probable que el resto de las condiciones (variables) que requieren los vectores se cumplan, pero debido a la importancia y aporte del índice de rezago social en el modelo, su superficie de riesgo potencial muy alto disminuye.

De la contribución de las variables, el índice de rezago social es el que mayor peso mostró, lo cual puede ser explicado por dos de los indicadores que se incluyen en esta variable que son la población sin derechohabiencia a servicios de salud, y viviendas con piso de tierra (CONEVAL, 2018), ya que, como lo mencionan diferentes autores, los principales factores de riesgo para la enfermedad de Chagas son la pobreza, la marginación y las malas condiciones de vivienda (Fernández, 2003; Arteaga y Ortega, 2010; Guadalupe-Pérez et al., 2011).

Respecto a los usos de suelo y vegetación, como se mencionó, los asentamientos humanos son los que presentan mayor efecto en el patrón de distribución de Triatoma en el estado, lo que cobra sentido, porque las especies reportadas por López-Cárdenas et al., 2005, tienen ámbitos intradomiciliarios. En un segundo nivel de asociación se encuentran aspectos que reflejan la modificación de la cobertura vegetal como la agricultura y vegetación secundaria, lo cual se relaciona con lo reportado en diferentes trabajos, que indican que la presencia de algunas especies de triatomínos está relacionada con alteraciones en la cobertura vegetal por actividades antrópicas como la agricultura, el pastoreo y la pérdida de cobertura forestal (López-Cancino et al., 2015; Ramsey et al., 2012; Sandoval et al., 2006), lo que podría explicar la importancia de esta variable, ya que ninguna otra variable del modelo refleja las condiciones de la modificación de la estructura y composición de la vegetación.

Este comportamiento indica que la modificación de los sistemas naturales por la acción del hombre que se expresa en cambio de uso de suelo, deforestación, incremento de la matriz agrícola, entre otros, tiene un efecto en la distribución de Triatoma en el estado. Lo anterior puede contribuir a la domiciliación del taxón, ya que al modificarse la vegetación, las características (en ámbito selvático) que requieren los vectores, éstos también cambian y se desplazan hacia los sitios en donde pueden encontrarse algunas otras fuentes de alimento que se encuentran asociadas a la población humana (peridomicilio – intradomicilio).

En cuanto a los resultados de la prueba de Jackknife, éstos reflejan un comportamiento similar en la distribución de Triatoma frente a las variables sociales, ya que el índice de rezago social, la población con una carencia social y el índice de desarrollo humano son aquellas que mostraron mayor permutación de importancia; ello puede deberse a que estas tres variables sociales incluyen criterios similares en temas de salud, educación y nivel de vida como son: acceso a servicios médicos, hacinamiento, tipo de piso en la vivienda, nivel de escolaridad, e ingresos familiares. Estas variables en conjunto muestran la vulnerabilidad social de la población; en otras palabras, los niveles de pobreza y marginación favorecen a la distribución de Triatoma y por lo tanto incrementan el riesgo epidemiológico, como lo menciona Valdez, 2016, quien indica que la precariedad de las condiciones de vida, la pobreza y la marginación, son factores que ponen en riesgo a la población ante la transmisión vectorial de *T. cruzi* en las poblaciones rurales y urbanas.

En cuanto a la temperatura, como se observó en los resultados tanto de contribución como de importancia, es la variable de menor poder explicativo en la evaluación del modelo, lo

cual se contrapone con diversos trabajos que se han enfocado en analizar el efecto de variables climáticas en el patrón de distribución de Triatoma con MaxEnt, en los que se ha identificado que este componente ambiental es determinante en el entendimiento de la distribución de triatominos (Badel-Mogollón et al., 2017; Ceccarelli et al., 2015; Parra-Henao et al., 2016; Pereira et al., 2013); lo anterior se atribuye a la incorporación de variables sociales en la predicción, debido a que reflejan en mejor medida la relación del vector con la población humana que influye directamente en su nicho, como se ha demostrado en esta investigación.

Respecto a los intervalos de temperatura de Triatoma para el estado de Guanajuato se descubrió que las temperaturas entre 20 y 21 °C favorecen a la presencia del vector, mismos representan los valores más altos en la entidad, lo que concuerda con lo mencionado por Badel-Mogollón et al., 2017, que mencionan que la mayor diversidad de especies de triatominos se localiza en biomas de temperaturas altas entre 21 a 24°C.

En el caso de la redundancia que mostraron los índices de rezago social y de desarrollo humano en la prueba de GWR, ésta se atribuye a que ambos incluyen criterios similares como son: población sin acceso a servicios de salud, tipo de piso (de tierra), y viviendas sin drenaje (CONEVAL, 2018), por lo que se sugiere ampliar el análisis con otros índices e indicadores sociales que no reflejen la misma explicación para evitar estos sesgos.

Por lo anterior, se considera que la incorporación de variables sociales y ambientales puede ayudar a interpretar y comprender desde una perspectiva espacial la relación de la distribución potencial de Triatoma con las propias características de rezago socioeconómico y el hábitat en el estado de Guanajuato.

Conclusiones

Las áreas de mayor riesgo potencial por distribución de Triatoma se concentran en la región Noreste del estado, lo que se relaciona espacialmente con la vulnerabilidad social de la población, identificando que el municipio de Victoria mostró mayores valores de entropía, y el de mayor nivel de riesgo, Tierra blanca. En la evaluación con MaxEnt las variables de mayor peso para modelar la presencia de Triatoma son: el índice de rezago social, el uso de suelo y vegetación, elevación y pendiente; esta respuesta se confirmó con los valores obtenidos con GWR, debido a que el índice de rezago social es la variable que más explica la distribución potencial de Triatoma para esa prueba, seguida del índice de desarrollo humano y el uso de suelo y vegetación. En cuanto a los valores de permutación de importancia de las variables, éstas expresaron un comportamiento similar; las que presentan un mayor efecto en la distribución potencial de Triatoma son: el índice de rezago social, el índice de desarrollo humano, y el porcentaje de la población con una carencia social, mientras que la variable que tiene la mayor información y que no está presente en las otras variables es el uso de suelo y vegetación. Encontramos que en ambos casos las variables socioeconómicas explican en más de 50 % la predicción de la distribución de Triatoma en el estado. Con estos resultados se comprueba que las variables sociales tienen un fuerte poder explicativo en la predicción de la distribución y riesgo potencial de Triatoma en el estado de Guanajuato. Por lo anterior, podemos decir que la elección meticulosa de las variables que contextualicen con mayor profundidad la historia natural de estos vectores y el entorno social del huésped, puede resultar más crítico que el propio modelo de nicho ecológico. Así mismo, se sugiere que se diseñen modelos con un análisis previo de los indicadores sociales y variables biofísicas para conocer el peso y evitar redundancias en las predicciones, todo ello con el objetivo de mejorar y ampliar la incorporación de variables sociales en este tipo de investigaciones del vector de la enfermedad de Chagas.

Referencias

- Arteaga, V. F. y Ortega, A. V. (2010). La cara oculta de la enfermedad de Chagas. *Archivos Bolivianos de Medicina*, XIV (82), 47 - 52. Recuperado de <http://www.revistasbolivianas.org.bo/pdf/abm/v14n82/v14n82a12.pdf>
- Badel-Mogollón, J., Rodríguez-Figueroa, L. y Parra-Henao, G. (2017). Análisis espacio-temporal de las condiciones biofísicas y ecológicas de *Triatoma dimidiata* (Hemiptera: Reduviidae: Triatominae) en la region nororiental de los Andes de Colombia. *Biomédica*, 37 (Supl. 2), 106 – 123. doi:<https://doi.org/10.7705/biomedica.v34i2.3496>
- Ceccarelli, S., Balsalobre, A., Susevich, M. L., Echeverria, M. G., David Eladio Gorla, D. E. & Martí, G. A. (2015). Modelling the potential geographic distribution of triatomines infected by *Triatoma* virus in the southern cone of South America. *Parasites & Vector*, 8 (153), pp. 9. Recuperado de <https://parasitesandvectors.biomedcentral.com/track/pdf/10.1186/s13071-015-0761-1>
- Cruz-Reyes, A. & Pickering-López, J. M. (2006). Chagas disease in Mexico: an analysis of geographical distribution during the past 76 years - A review. *Memórias do Instituto Oswaldo Cruz*, 101(4), 345-354. <https://dx.doi.org/10.1590/S0074-02762006000400001>
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). (2005). Estudio Previo Justificativo para el establecimiento del Área Natural Protegida “Reserva de la Biosfera Sierra Gorda de Guanajuato”. Instituto de Ecología del Estado de Guanajuato. 281 pp. Recuperado de https://www.academia.edu/32503507/RESERVA_DE_LA BIOSFERA_SIERRA_GORDA_DE_GUANAJUATO_NOVIEMBRE_2005.
- Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL). (2018). Índice de Rezago Social. Recuperado de <https://www.coneval.org.mx>
- Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). (2015). *Hablamos de Chagas: aportes para re-pensar la problemática con una mirada integral*. Buenos Aires, Argentina: CONICET.
- Diniz-Filho, J. A., Ceccarelli, S., Hasperué, W. & Rabinovich, J. (2013). Geographical patterns of Triatominae (Heteroptera: Reduviidae) richness and distribution in the Western Hemisphere. *Insect Conservation and Diversity*, 6(6), 794 – 714. <https://doi.org/10.1111/icad.12025>
- Fernández, T. (2003). La enfermedad de Chagas: una identidad con la pobreza. *Alternativas*, 4(6), 127 – 131. Recuperado de: <https://www.researchgate.net/publication/298787120>

Fotheringham, A., Brunsdon, Ch. & Charlton, M. (2002). *Geographically Weighted Regression*. Chichester: Wiley.

Leite, G. R., Dos Santos, C. B. & Falqueto, A. (2011). Influence of the landscape on dispersal of sylvatic triatomines to anthropic habitats in the Atlantic Forest. *J. Biogeographic*, 38(4), 651-663. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2010.02442.x>

López-Cancino, S. A., Tun-Ku, E., De la Cruz-Felix, H. K., Ibarra-Cerdeña, C. N., Izeta-Alberdi, A., Pech-May, A., Mazariegos-Hidalgo, C. J., Valdez-Tah, A., Ramsey, J. M. (2015). Landscape ecology of *Trypanosoma cruzi* in the southern Yucatan Peninsula. *J. Acta Tropical*, 151, 58-72. doi: 10.1016/j.actatropica.2015.07.021

López-Cárdenas, J., González-Bravo, F.E., Salazar-Schettino, P.M., Gallaga-Solórzano, J.C., Ramírez-Barba, E., Martínez-Méndez, J., Sánchez-Cordero, V., Peterson, T., Ramsey, J.M. (2005). Fine-scale predictions of distribution of Chagas disease vectors in the state of Guanajuato, Mexico. *J. Med. Entomol.* 42(6), 1068-1081. Recuperado de <https://pdfs.semanticscholar.org/aaf8/24c3cc13b6ec5cf4cdf0ae04c4deb9c429e7.pdf>

Parra-Henao, G., Suárez-Escudero, L. C. & González-Caro, S. (2016). Potential distribution of Chagas Disease vectors (Hemiptera, Reduviidae, Triatominae) in Colombia, Based on Ecological Niche Modeling. *J. of Tropical Medicine*, 2016, Article ID 1439090, pp. 10. <https://doi.org/10.1155/2016/1439090>.

Pereira, J. M., Almeida, P., Sousa, A., Aecio, P., Machado, R. & Gurgel-Goncalves, R. (2013). Climatic factors influencing triatomine occurrence in Central-West Brazil. *Memórias do Instituto Oswaldo Cruz*, 108(3), 335-341. <https://dx.doi.org/10.1590/S0074-02762013000300012>

Peterson, A. T., Sánchez-Cordero, V., Ben Beard, C., & Ramsey, J. M. (2002). Ecologic niche modeling and potential reservoirs for Chagas Disease, Mexico. *Emerging Infectious Diseases*, 8(7), 662-667. <https://dx.doi.org/10.3201/eid0807.010454>.

Phillips, S.J., Anderson, R. P. & Schapire, R. P. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190(3–4), 231-259. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>.

Ramsey, J. M., Gutiérrez-Cabrera, A. E., Salgado-Ramírez, L., Peterson, A.T., Sánchez-Cordero, V., Ibarra-Cerdeña, C.N. (2012) Ecological connectivity of *Trypanosoma cruzi* reservoirs and *Triatoma pallidipennis* hosts in an anthropogenic landscape with endemic Chagas Disease. *PLOS ONE*, 7(9), pp.11. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0046013>

Ramsey, J. M., Peterson, A. T., Carmona-Castro, O., Moo-Llanes, D. A., Nakazawa, Y., Butrick, M., Tun-Ku, E., de la Cruz-Félix, K., & Ibarra-Cerdeña, C. N. (2015). Atlas of Mexican Triatominae (Reduviidae: Hemiptera) and vector transmission of Chagas Disease. *Memórias do Instituto Oswaldo Cruz*, 110(3), 339-352. <https://dx.doi.org/10.1590/0074-02760140404>

Salazar-Schettino, P.M., Rosales-Piña, J.S., Rojas-Wastavino, G., Cabrera-Bravo, M., Vences-Blanco, M. & López-Cárdenas, J. (2007). *Triatoma mexicana* (Hemiptera: Reduviidae) in Guanajuato, Mexico: house infestation and seasonal variation. *Memórias do Instituto Oswaldo Cruz*, 102(7), 803-807. <https://dx.doi.org/10.1590/S0074-02762007005000118>

Salazar-Schettino, P.M., Bucio-Torres, M.I., Cabrera-Bravo, M., de Alba-Alvarado, M.C., Castillo- Saldaña, D.R., Zenteno-Galindo, E.A., Rojo-Medina, J., Fernández-Santos, N.A., Perera-Salazar, M.G. (2016). Enfermedad de Chagas en México. *Revista de la Facultad de Medicina de la UNAM*, 59(3), 6 – 16. Recuperado de <http://www.medigraphic.com/pdfs/facmed/un-2016/un163c.pdf>

Sandoval C., Cárdenas R., Rodríguez M.A., Jaimes E., Mendoza J. (2006). Medio ambiente y protozoosis sistémicas III. Los vectores de la enfermedad de Chagas y su asociación con los factores climáticos. *ACADEMIA*, V(9), 65 –74. Recuperado de <http://erevistas.saber.ula.ve/index.php/academia/article/viewFile/5986/5789>

Soberón J. & Peterson A. T. (2005). Interpretation of models of fundamental ecological niches and species' distributional areas. *Biodiv Informatics* 2, 1-10. Recuperado de <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.584.8988&rep=rep1&type=pdf>.

Valdez, A. R. (2016). La vulnerabilidad socioambiental ante la transmisión vectorial de la enfermedad de Chagas en Yucatán, México. *Antrópica. Revista de Ciencias Sociales y Humanidades*, 2 (4), 183- 196.