



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

**PROGRAMA DE POSTGRADO EN RECURSOS GENÉTICOS Y
PRODUCTIVIDAD**

GANADERÍA

DISTRIBUCIÓN POTENCIAL, ABUNDANCIA Y CARACTERIZACIÓN DE LA COBERTURA VEGETAL DE LOS SITIOS DE ANIDACIÓN DEL TECOLOTE LLANERO OCCIDENTAL (*Athene cunicularia hypugaea*) EN EL NORORIENTE DEL VALLE DE MÉXICO

JAMIL JAZIEL LABRADA ZAPATA

T E S I S
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

2017

CARTA DE CONSENTIMIENTO DE USO DE LOS DERECHOS DE AUTOR Y DE LAS REGALIAS COMERCIALES DE PRODUCTOS DE INVESTIGACION

En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, el que suscribe Jamil Jaziel Labrada Zapata, Alumno (a) de esta Institución, estoy de acuerdo en ser partícipe de las regalías económicas y/o académicas, de procedencia nacional e internacional, que se deriven del trabajo de investigación que realicé en esta institución, bajo la dirección del Profesor María Guadalupe Bravo Vinaja, por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis

Distribución potencial, abundancia y caracterización de la cobertura vegetal de los sitios de anidación del tecolote llanero occidental (Athene cunicularia hypugaea) en el nororiente del Valle de México

y de los producto de dicha investigación al Colegio de Postgraduados. Las patentes y secretos industriales que se puedan derivar serán registrados a nombre el colegio de Postgraduados y las regalías económicas que se deriven serán distribuidas entre la Institución, El Consejero o Director de Tesis y el que suscribe, de acuerdo a las negociaciones entre las tres partes, por ello me comprometo a no realizar ninguna acción que dañe el proceso de explotación comercial de dichos productos a favor de esta Institución.

Montecillo, Mpio. de Texcoco, Edo. de México, a 4 de diciembre de 2017

Firma del
Alumno (a)

Dra. María Guadalupe Bravo Vinaja
Vo. Bo. del Consejero o Director de Tesis

La presente tesis titulada: **Distribución potencial, abundancia y caracterización de la cobertura vegetal de los sitios de anidación del tecolote llanero occidental (*Athene cunicularia hypugaea*) en el nororiente del Valle de México** realizada por el alumno: **Jamil Jaziel Labrada Zapata** bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS
RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD
GANADERÍA

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERA



DRA. MARÍA GUADALUPE BRAVO VINAJA

ASESOR



DR. JOSÉ LUIS ALCÁNTARA CARBAJAL

ASESOR



M.C. LENOM CAJUSTE BONTEMPS

Montecillo, Texcoco, Estado de México, noviembre de 2017

**DISTRIBUCIÓN POTENCIAL, ABUNDANCIA Y CARACTERIZACIÓN DE LA
COBERTURA VEGETAL DE LOS SITIOS DE ANIDACIÓN DEL TECOLOTE
LLANERO OCCIDENTAL (*Athene cunicularia hypugaea*) EN EL NORORIENTE DEL
VALLE DE MÉXICO**

**Jamil Jaziel Labrada Zapata, M. en C.
Colegio de Postgraduados, 2017**

RESUMEN

El tecolote llanero occidental (*Athene cunicularia hypugaea*) es una especie que se encuentra amenazada; su distribución incluye el centro de México, donde su hábitat disminuye debido al desarrollo urbano. El objetivo de este estudio fue determinar la distribución, abundancia y caracterizar la vegetación de los sitios de anidación de la especie en el Valle de México. De enero a julio del 2016 se establecieron transectos en el área de estudio, en mayo y julio se estimó la altura y cobertura vegetal de los sitios de anidación. Con los datos de presencia/ausencia obtenidos y variables predictivas climáticas, edafológicas y relativas a los usos de suelo se construyeron modelos de distribución potencial con regresión logística, lineal y máxima entropía. Las variables climáticas fueron más importantes para predecir la distribución del tecolote, y de éstas la precipitación del trimestre más cálido fue la de mayor influencia. Los modelos coincidieron en predecir las mismas zonas de distribución. Se estimaron 0.5 individuos km⁻¹ y 1.0 nidos km⁻², y la densidad de nidos es mayor a la reportada en Canadá, pero se encuentra cerca del límite inferior del rango de las estimadas en Estados Unidos y el norte de México. Sin embargo, las estimaciones de abundancia obtenidas tienen una baja precisión debido a que el conjunto de datos usados es pequeño. El 78 % de las madrigueras fueron naturales, ubicándose la mayoría en zonas de pastizales. Las coberturas de herbáceas, material muerto y árboles fueron iguales en todos los sitios de anidación. La mayor superficie de suelo desnudo se presentó en pastizales, y los pastos fueron la mayor cobertura en todos los sitios de anidación. La vegetación con menor altura se presentó en los pastizales (20.1 cm) y la mayor en áreas agrícolas (72.4 cm). Las condiciones del hábitat encontradas reiteran la tolerancia del tecolote llanero a la presencia humana.

Palabras clave: vegetación, índice de abundancia, regresión logística, regresión lineal, máxima entropía, MaxEnt.

**POTENTIAL DISTRIBUTION, ABUNDANCE AND CHARACTERIZATION OF
VEGETATION OF NESTING SITES OF WESTERN BURROWING OWL IN
NORTHEAST OF MEXICO VALLE**

**Jamil Jaziel Labrada Zapata, M. en C.
Colegio de Postgraduados, 2017**

ABSTRACT

The western burrowing owl (*Athene cunicularia hypugaea*) is a threatened species. Its geographical range includes central Mexico, where its habitat has declined due to urban development. The objective of this study was assessing its distribution and abundance, and characterizing the vegetation surrounding nesting sites in Mexico Valley. From January to July 2016 I surveyed for burrowing owls along transects in the study area; I measured cover height and ground cover in May and July. I built logistic and linear regression potential distribution models, as well as maximum entropy models using presence/absence data and climatic, edaphic and landscape predictive variables. Climatic variables were the most important to predict burrowing owl distribution, and of those, rainfall of the warmest quarter had the greater influence. The three models predicted the same distribution areas. I found 0.5 individuals km⁻¹ and 1.0 nests km⁻². Nest density was higher than in Canada, but it was close to the lower limit of the densities reported in the United States and northern Mexico. However, the abundance show a low precision due to the small data set used. 78% of the burrows were natural and most of them were located in grassland areas. The herbaceous cover, woody debris and trees were similar across all nesting sites. Grasslands had the largest bare soil percentages, and in all nesting sites grass was the main cover. The lowest height vegetation was found in grasslands (20.1 cm) and the highest was in farmlands (72.4 cm). These results indicate a high tolerance of burrowing owls to human presence.

Keywords: vegetation, abundance index, logistic regression, linear regression, maximum entropy, MaxEnt.

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a mis padres: Jesús Labrada y Marisela Zapata, por el amor, cariño, consejos y apoyo para concluir esta etapa de mi vida. Por mostrarme el camino que he tomado.

A mi amiga y esposa, Elvira, por su amor, sacrificio y entrega en el logro de este trabajo.

A Yory, por el cariño, consejos y apoyo con los que he podido avanzar en mi desarrollo personal y profesional.

A mi familia y amigos que están cerca, y a quienes a pesar de la distancia, siempre me acompañan: por el cariño, consejos y apoyo para concluir ésta etapa en mi vida.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por apoyarme con una beca para continuar y concluir mis estudios de Maestría.

Al personal que labora en el Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, y en particular en Ganadería, por brindarme las facilidades académicas y poner a mi alcance las herramientas necesarias para mi crecimiento personal y profesional

A mi consejo particular conformado por la Dra. María Guadalupe Bravo Vinaja, Dr. José Luis Alcántara Carbajal y Dr. Lenom Cajuste Bontemps por apoyarme en el desarrollo de este trabajo y encaminarme en esta área de conocimiento hacia nuevas inquietudes y metas.

CONTENIDO

RESUMEN	iv
ABSTRACT.....	v
LISTA DE CUADROS.....	x
LISTA DE FIGURAS.....	xii
INTRODUCCIÓN GENERAL	1
OBJETIVOS	3
REVISIÓN DE LITERATURA	3
Taxonomía	3
Hábitat.....	3
Distribución	4
Registros en el nororiente del Valle de México.....	6
Distribución potencial del tecolote llanero occidental en México.....	8
Situación actual.....	11
LITERATURA CITADA	12
Capítulo 1 . DISTRIBUCIÓN POTENCIAL DEL TECOLOTE LLANERO OCCIDENTAL EN EL NORORIENTE DEL VALLE DE MÉXICO	15
RESUMEN	15
INTRODUCCIÓN.....	16
MATERIALES Y MÉTODOS.....	17
Área de estudio	17
Datos de presencia/ausencia de <i>Athene cunicularia hypugaea</i>	19
Variables predictivas.....	22
Construcción y selección del modelo	25
Modelo de regresión logística.....	25
Modelo de regresión lineal	26
Modelo de máxima entropía	27
Evaluación del modelo.....	28
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	29
Modelo de Regresión Logística	34
Modelo de Regresión Lineal.....	39
Modelo de máxima entropía	44
Evaluación de los modelos	51
CONCLUSIONES	54
LITERATURA CITADA	55

Capítulo 2 . ABUNDANCIA DE TECOLOTE LLANERO OCCIDENTAL EN EL NORORIENTE DEL VALLE DE MÉXICO.....	63
RESUMEN	63
INTRODUCCIÓN	64
MATERIALES Y MÉTODOS	65
Área de estudio	65
Abundancia de tecolote llanero.....	67
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	69
CONCLUSIONES	72
LITERATURA CITADA	73
Capítulo 3 . VEGETACIÓN DE SITIOS DE ANIDACIÓN DE TECOLOTE LLANERO OCCIDENTAL EN EL NORORIENTE DEL VALLE DE MÉXICO	77
RESUMEN	77
INTRODUCCION	78
MATERIALES Y MÉTODOS	79
Área de estudio	79
Estimación de la altura y cobertura vegetal	81
Análisis de datos	83
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	83
Cobertura vegetal de los sitios de anidación de tecolote llanero	83
CONCLUSIONES	90
LITERATURA CITADA	91
CONCLUSIONES GENERALES.....	94
RECOMENDACIONES.....	95

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Registros históricos de tecolote llanero occidental en el Valle de México.	6
Cuadro 1.1. Variables predictivas climáticas, edafológicas y de uso de suelo para la construcción de modelos de distribución potencial de tecolote llanero occidental en el nororiente del Valle de México en 2016.	24
Cuadro 1.2. Comparación de medias, desviación estándar y coeficiente de variación de las variables predictivas climáticas, edafológicas y de uso de suelo en sitios con presencia y ausencia de tecolote llanero en el nororiente del Valle de México, año 2016.....	31
Cuadro 1.3. Pruebas de normalidad y significancia de las variables predictivas climáticas, edafológicas y de uso de suelo usadas para la construcción de modelos de distribución potencial del tecolote llanero en el nororiente del Valle de México en 2016.....	32
Cuadro 1.4. Coeficientes de correlación de Spearman entre las variables predictivas climáticas y edafológicas usadas para la construcción de modelos de distribución potencial del tecolote llanero en el nororiente del Valle de México en 2016.....	34
Cuadro 1.5. Categorización de modelos de regresión logística propuestos para la distribución potencial de tecolote llanero en el nororiente del Valle de México, de acuerdo al criterio de información de Akaike (AIC), año 2016.	35
Cuadro 1.6. Coeficientes de las variables, error estándar, probabilidades y límites de confianza al 95% de las variables predictivas en el modelo de regresión	

logística Pend+Tmax+Ptgru+Pp3cal para la distribución del tecolote llanero en el nororiente del Valle de México en 2016.....	36
Cuadro 1.7. Categorización de modelos de regresión lineal propuestos para la distribución potencial en el nororiente del Valle de México del tecolote llanero en 2016 de acuerdo al valor de R^2 ajustada.....	39
Cuadro 1.8. Coeficientes de las variables predictivas en el mejor modelo de regresión lineal múltiple Pend+pTgru+Tanual+Tmax+Pp3cal, para la distribución del tecolote llanero en el nororiente del Valle de México, en 2016.....	41
Cuadro 1.9. Construcción de modelos de máxima entropía de acuerdo a la omisión de variables predictivas por el menor decrecimiento en la ganancia de entrenamiento con la prueba de Jackknife para la distribución potencial del tecolote llanero en el nororiente del Valle de México en 2016.	45
Cuadro 1.10. Evaluación de los modelos empleados para la distribución potencial de tecolote llanero en el nororiente del Valle de México en 2016.	52
Cuadro 3.1. Número de madrigueras de tecolote llanero en áreas agrícolas, pastizales y áreas urbanas en el nororiente del Valle de México en 2016.	86
Cuadro 3.2. Cobertura promedio (%) de pastos, herbáceas, suelo desnudo, infraestructura y superficies pavimentadas, árboles y áreas agrícolas en sitios de anidación de tecolote llanero en el nororiente del Valle de México en 2016, de acuerdo con el uso de suelo y vegetación.	87
Cuadro 3.3. Altura promedio de vegetación en los sitios de anidación de tecolote llanero en el nororiente del Valle de México de acuerdo al uso de suelo y vegetación, año 2016.	88

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Distribución histórica y actual del tecolote llanero occidental. Tomado de Commission for Environmental Cooperation (2005).	5
Figura 2. Registros de tecolote llanero occidental <i>A. cunicularia</i> de 1931 a 1984 en el Valle de México	7
Figura 3. Distribución geográfica potencial de <i>Athene cunicularia hypugaea</i> en México, de acuerdo con Gómez de Silva (2006).	9
Figura 4. Distribución geográfica potencial en México del tecolote llanero occidental en verano, de acuerdo con Navarro y Peterson (2007).	10
Figura 5. Distribución geográfica potencial en México del tecolote llanero occidental en invierno, de acuerdo con Navarro y Peterson (2007).	11
Figura 1.1. División municipal del oriente del Estado de México y demarcación del área de estudio de tecolote llanero (<i>A. cunicularia</i>), año 2016.	18
Figura 1.2. Retícula de cuadros de 1 km sobre la distribución potencial del tecolote llanero de acuerdo con Gómez de Silva (2006) y transectos recorridos para determinar la presencia/ausencia del tecolote llanero durante la primera etapa en el nororiente del Valle de México, en 2016.	20
Figura 1.3. Retícula de cuadros de 1 km sobre el área de estudio de acuerdo con el ejercicio de modelación con máxima entropía, y transectos recorridos para corroborar la presencia/ausencia de tecolote llanero durante la primera y segunda etapa en 2016.	21
Figura 1.4. Datos de presencia-ausencia de tecolote llanero en el nororiente del Valle de México en 2016.	30

Figura 1.5. Curvas de respuesta de cada una de las variables predictivas que componen el modelo de Regresión Logística $P_{end}+T_{max}+P_{tgru}+P_{p3cal}$ para la distribución del tecolote llanero en el nororiente del Valle de México en 2016. 37

Figura 1.6. Probabilidad de presencia de tecolote llanero occidental en el nororiente del Valle de México, de acuerdo con el modelo de regresión logística $P_{end}+T_{max}+P_{tgru}+P_{p3cal}$ y datos de presencia/ausencia del 2016..... 38

Figura 1.7. Curvas de respuesta de cada una de las variables predictivas en el modelo de regresión lineal $P_{end}+p_{Tgru}+T_{anual}+T_{max}+P_{p3cal}$ con respecto a la probabilidad de presencia de tecolote llanero occidental en el nororiente del Valle de México en 2016..... 42

Figura 1.8. Probabilidad de presencia de tecolote llanero occidental en el nororiente del Valle de México de acuerdo al modelo de regresión lineal con las variables $P_{end}+p_{Tgru}+T_{anual}+T_{max}+P_{p3cal}$ y datos de presencia/ausencia del 2016. 43

Figura 1.9. Prueba de importancia de Jackknife en la ganancia de entrenamiento en el modelo inicial de máxima entropía con todas las variables para la distribución potencial de tecolote llanero occidental en el nororiente del Valle de México en 2016. 45

Figura 1.10. Curvas de respuesta de cada una de las variables predictivas en el modelo de máxima entropía $P_{end}+P_{p3cal}+p_{Tgru}+T_{anual}+T_{max}+EstT$, con respecto a la probabilidad de presencia de tecolote llanero occidental en el nororiente del Valle de México en 2016..... 47

Figura 1.11. Predicciones de probabilidad de presencia del tecolote llanero occidental (*Athene cunicularia hypugaea*) en el nororiente del Valle de México calculadas

mediante el modelo de máxima entropía con base en las variables Pend+Pp3cal+Tmax+pTgru+EstT+Tanual y datos de presencia/ausencia recolectados en 2016.....	48
Figura 2.1. División municipal del oriente del Estado de México y demarcación del área de estudio de tecolote llanero (<i>A. cunicularia</i>), año 2016.....	66
Figura 2.2. Retícula de cuadros de 1 km sobre el área de estudio y transectos recorridos para estimar la abundancia de tecolote llanero en 2016.	68
Figura 3.1. División municipal del oriente del Estado de México y demarcación del área de estudio de tecolote llanero (<i>A. cunicularia</i>), año 2016.....	80
Figura 3.2.a) Establecimiento de transectos y marco Daubenmire alrededor de las madrigueras de tecolote llanero. b) Método Daubenmire para la estimación de la cobertura vegetal.....	83
Figura 3.3. Madrigueras de tecolote llanero registradas en 2016 en el nororiente del Valle de México.	84
Figura 3.4. Madrigueras artificiales de tecolote llanero en el nororiente del Valle de México en 2016: a) caja de riego y b) tubería de riego rota.	85
Figura 3.5. Madrigueras naturales utilizadas por tecolote llanero en el nororiente del Valle de México en 2016: a) madriguera en pastizal inducido, b) madriguera en área agrícola.	85

INTRODUCCIÓN GENERAL

El tecolote llanero occidental (*Athene cunicularia hypugaea*) es una de las veinte subespecies que existen actualmente de esta especie (Clements *et al.*, 2017). Es un ave de aproximadamente 20 a 25 cm, que pesa de 130 a 150 g. Es bicolor, esto es, su dorso es café con manchas blancas y el frente es color café claro. Se caracteriza por habitar en madrigueras en el suelo y tener hábitos diurnos y crepusculares (Coulombe, 1971).

Este búho tiene una amplia distribución en Norteamérica (Poulin *et al.*, 2011), aunque en los últimos años se ha registrado una disminución de las poblaciones en Canadá y Estados Unidos, principalmente por factores como la pérdida y fragmentación de hábitat, y la extirpación de colonias de perritos de la pradera (Klute *et al.*, 2003).

En México, existen poblaciones reproductoras de tecolote llanero en el norte y centro del país, aunque hay registros de la especie en toda la República Mexicana durante la temporada invernal (Enríquez y Vázquez-Pérez, 2015). La población residente en la región central del país (Estado de México, Ciudad de México e Hidalgo) parece estar aislada genéticamente de las que se encuentran en el norte de México y separada geográficamente por más de 400 km de las mismas (Macias-Duarte, 2011). Además, dicha población se encuentra en una zona que hace frente a un fuerte crecimiento poblacional (INEGI, 2015) y acelerado desarrollo urbano.

A pesar de que es una especie que ha sido ampliamente estudiada en Estados Unidos y Canadá, la información sobre el tecolote en México se concentra en el norte del país, y principalmente abarca características como abundancia poblacional (Rodríguez-Estrella y Ortega-Rubio, 1993; Ruiz-Ayma *et al.*, 2016; Iturribarria-Rojas, 2002; Macias-Duarte, 2011; Valencia-Maldonado *et al.*, 2016), y reproducción y atributos del hábitat (Rodríguez-Estrella y Ortega-Rubio, 1993). Sin embargo, para la región del centro de México falta información

detallada sobre la distribución, ecología, abundancia o tendencia poblacional de las poblaciones del tecolote llanero.

Por consiguiente, es importante estudiar la distribución en la parte central de México particularmente del nororiente del Valle de México, donde se concentran los registros históricos de la especie (Townsend Peterson y Navarro-Sigüenza, 2006), así como las características del hábitat y conocer su abundancia, esta última para establecer una línea de base que permita el monitoreo de sus poblaciones en los años subsiguientes.

La presente tesis de investigación se compone de una introducción, tres capítulos independientes y conclusiones generales:

El capítulo 1 “*Distribución potencial del tecolote llanero occidental en el nororiente del Valle de México*” tuvo como objetivo generar modelos de distribución potencial de la especie, mediante regresión logística, lineal y máxima entropía, e identificar las variables ambientales que explican la presencia del tecolote llanero en el área de estudio.

El capítulo 2 “*Abundancia de tecolote llanero occidental en el nororiente del Valle de México*” tuvo como fin obtener información relacionada al tamaño de las poblaciones en el nororiente del Valle de México, mediante el uso de transectos.

El capítulo 3 “*Vegetación en los sitios de anidación del tecolote llanero occidental en el nororiente del Valle de México*” buscó caracterizar la vegetación en los sitios de anidación de la especie en el área de estudio.

OBJETIVOS

Objetivo general

- Caracterizar la distribución, abundancia y algunas características del hábitat de *Athene cunicularia hypugaea* en el área nororiente del Valle de México.

Objetivos particulares

- Definir el área de distribución potencial de la especie mediante varios modelos que usan factores bióticos y abióticos.
- Estimar la abundancia de la población.
- Caracterizar la cubierta vegetal alrededor de las madrigueras.

REVISIÓN DE LITERATURA

Taxonomía

Athene cunicularia tiene una distribución amplia en el continente americano y actualmente se reconocen 22 subespecies, dos de las cuales están extintas. Tres de las subespecies se localizan en Norteamérica: *A. cunicularia hypugaea*, que se distribuye desde Canadá hasta Centroamérica; *A. c. floridana* en el centro y sur de Florida, Cuba y Bahamas y *A. c. rostrata* en las Islas de Revillagigedo (Clements *et al.*, 2017).

Hábitat

El tecolote llanero occidental ocurre en pastizales naturales y cultivados, desiertos, estepas arbustivas, orillas de terrenos agrícolas, diques y bermas de tierra, lotes baldíos, márgenes de aeropuertos, campos de golf, zonas residenciales y caminos (Gervais *et al.*, 2008).

Tales hábitats se caracterizan por ser terrenos abiertos y bien drenados, con vegetación dispersa y baja, generalmente con ausencia de árboles y con presencia de madrigueras de mamíferos cavadores, cavidades naturales o estructuras artificiales que le sirvan de nidos (Gervais *et al.*, 2008; Klute *et al.*, 2003).

La presencia humana en los ecosistemas puede crear de manera intencional o inadvertida, condiciones adecuadas para que el tecolote llanero los habite (Lincer y Bloom, 2007). Por ejemplo, la superficie ocupada por agricultura y sistemas de riego pueden contener sitios que pueden ser usados como madrigueras y zonas de alimentación (Gervais *et al.*, 2008).

Sin embargo, el tecolote llanero puede ser muy sensible a la presencia humana y sus actividades; por ejemplo, en áreas agrícolas son afectados negativamente por pesticidas (Engelman *et al.*, 2012), mientras que el desarrollo urbano ocasiona fragmentación y pérdida de hábitat, aumento de depredadores terrestres y la colisión con automóviles (Commission for Environmental Cooperation, 2005).

Para proveerse de suficientes presas durante la época de reproducción, el tecolote llanero podría necesitar una cobertura permanente y vegetación más alta en su área de alimentación (Poulin *et al.*, 2011).

Distribución

En la temporada de reproducción, de mediados de abril a mediados de octubre, *Athene cunicularia hypugaea* se distribuye en las zonas planas al oeste de Norteamérica, que abarcan las grandes planicies al oeste de Canadá, a través de Estados Unidos y hasta la zona central de México (Figura 1). El resto del año, las poblaciones de Canadá y el norte de Estados Unidos migran hacia el sur de éste último, México y hasta Centroamérica (Enríquez *et al.*, 2012; Howell

y Webb, 1995; Klute *et al.*, 2003; Poulin *et al.*, 2011). Por consiguiente, en México se encuentran poblaciones reproductoras en el norte, noreste y centro del país, mientras que en la época migratoria se han registrado en todo el país (Enríquez *et al.*, 2012).

Los registros históricos del tecolote llanero occidental (particularmente de la temporada de reproducción) han acreditado una disminución de sus poblaciones en los últimos 40 años en la parte noreste de su distribución original, como se observa en la Figura 1 (Environment Canada, 2012; Klute *et al.*, 2003; Macías-Duarte y Conway, 2015a). De acuerdo con Macías-Duarte (2011) una posible explicación para tal fenómeno es que las poblaciones migratorias del norte de Canadá y Estados Unidos han modificado su comportamiento migratorio y se han convertido en residentes en el sur de su distribución, donde el cambio de vegetación desértica a áreas agrícolas ha generado hábitat con una mayor productividad y disponibilidad de alimentos para la especie.



Figura 1. Distribución histórica y actual del tecolote llanero occidental. Tomado de Commission for Environmental Cooperation (2005).

Registros en el nororiente del Valle de México

Desde el siglo XIX se tienen registros del tecolote llanero en el Valle de México (Townsend Peterson y Navarro-Sigüenza, 2006). Por ejemplo, en diciembre de 1892 se recolectó el primer espécimen en la Ciudad de México (antes Distrito Federal) del que se tenga noticia; posteriormente, en los años 30 del siglo XX, se recolectaron otros dos en la misma localidad y uno en una zona aledaña del Estado de México (Cuadro 1 y Figura 2).

Cuadro 1. Registros históricos de tecolote llanero occidental en el Valle de México.

Fecha de recolecta	Localidad	Colección	Colector	Tipo de registro
06/dic/1892	Distrito Federal	Birds Collection, National Museum of Natural History of Smithsonian Institution	E. Nelson	Piel
16/jun/1931	Tecámac, Valle de México	Ornithology Collection, Occidental College	P. Grovelia	Piel
01/nov/1933	Nezahualcóyotl Distrito Federal	Ornithology Collection, Occidental College	W.W. Brown	Piel
24/oct/1937	Benito Juárez, Distrito Federal	Colección Nacional de Aves, UNAM	I. Quiroz	No disponible
21/oct/1982	Benito Juárez, Distrito Federal	Colección Nacional de Aves, UNAM	M. Ramírez	No disponible
23/oct/1984	Chapingo, Texcoco	Colección Nacional de Aves, UNAM	M. Valdez	No disponible

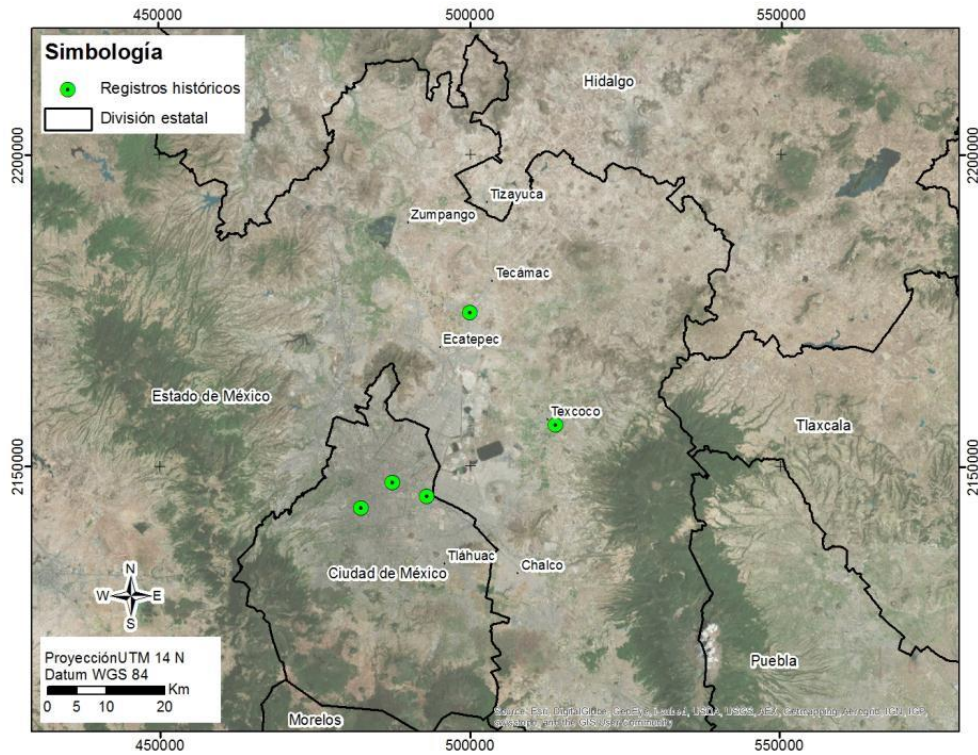


Figura 2. Registros de tecolote llanero occidental *A. cunicularia* de 1931 a 1984 en el Valle de México.

Fue hasta el año 2000 que se documentaron las primeras observaciones de parejas reproductoras de tecolote llanero en las cercanías de la ciudad de Texcoco, Estado de México (Fuentes y Márquez, datos no publicados en Cruz-Carretero y McDonnell, 2005). Hasta la fecha, otros estudios han registrado individuos que pertenecen a poblaciones invernantes y reproductoras permanentes en la misma área (Cruz-Carretero y McDonnell, 2005; Holroyd *et al.*, 2011; Macias-Duarte, 2011; Macías-Duarte y Conway, 2015b; McDonnell y Cruz-Carretero, 2006).

Sobre las poblaciones del Valle de México, solo se han publicado dos investigaciones, ambas centradas en la zona de Texcoco, Estado de México. La primera investigación indica que durante los inviernos de 2005 y 2006, dos investigadores (Cruz-Carretero y McDonnell, 2005;

McDonnell y Cruz-Carretero, 2006), auspiciados por el Departamento de Defensa de Estados Unidos, realizaron estudios acerca de las condiciones del hábitat invernal del tecolote llanero en México, y donde se incluyó a la zona del ex-lago de Texcoco. En esta localidad se encontró que el hábitat invernal se conforma principalmente de pastizales, áreas de pastoreo, zonas agrícolas y el lecho desecado del ex-lago. La segunda, que del 2004 al 2009 se recolectaron plumas y muestras de sangre de tecolote llanero en diferentes localidades de Canadá, Estados Unidos y México, donde también se incluyó una localidad de Texcoco (Macias-Duarte, 2011; Macías-Duarte y Conway, 2015b; Fuentes-Romero y Marquez-Olivas, datos no publicados).

Distribución potencial del tecolote llanero occidental en México

En México se han realizado dos estudios para conocer la distribución potencial del tecolote llanero, mediante modelación del nicho ecológico. En el primero, en 2006, Gómez de Silva usó el método conocido como *algoritmo genético para predicción de conjuntos de reglas* (GARP, por sus siglas en inglés) con 14 registros de la especie en localidades de climas extremos e información cartográfica de variables climáticas, topográficas y de tipos de suelo (Figura 3).

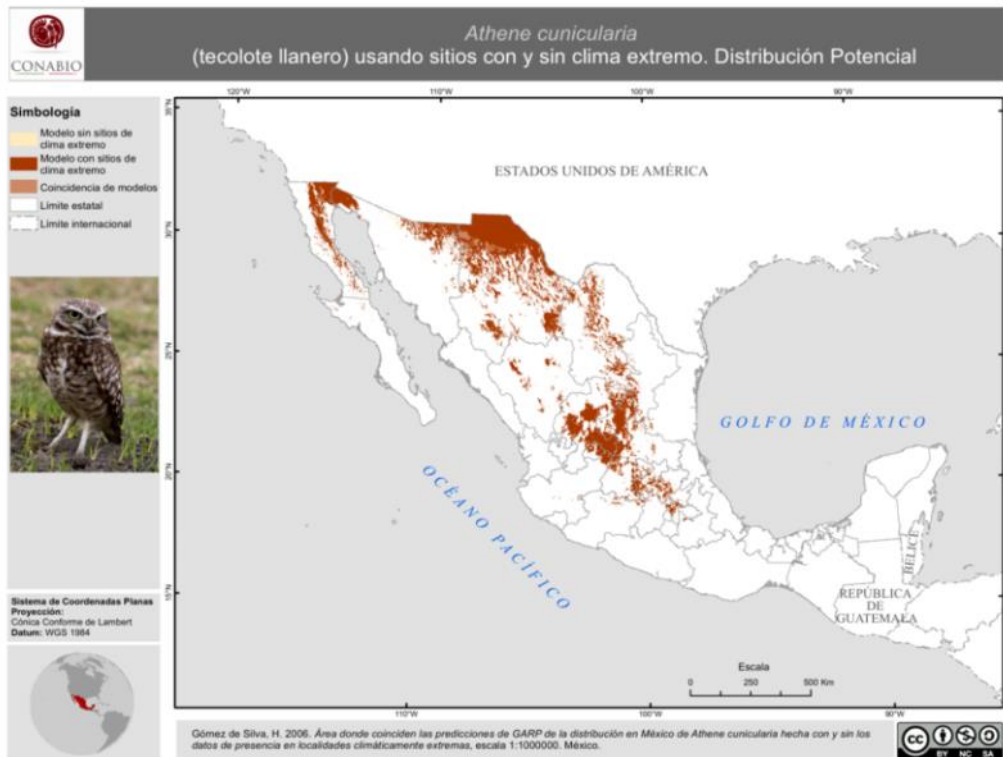


Figura 3. Distribución geográfica potencial de *Athene cunicularia hypugaea* en México, de acuerdo con Gómez de Silva (2006).

El segundo, de Navarro y Peterson (2007), también se hizo mediante GARP, aunque en esta ocasión tras una búsqueda exhaustiva de todos los registros de la especie en diferentes colecciones y museos del mundo; este ejercicio incluyó tanto la época de verano como la de invierno (Figura 4 y Figura 5).

Estos estudios, sin embargo, no predicen adecuadamente la distribución conocida del tecolote llanero. Es decir, el mapa de Gómez de Silva (2006) abarca principalmente el Altiplano Mexicano, Baja California y algunas pequeñas regiones del Eje Neovolcánico donde se localizan poblaciones de la especie, pero omite zonas de la distribución conocida en el norte de México. El de Navarro y Peterson (2007) para la época de verano coincide con la distribución predicha por

otros autores para las poblaciones reproductoras, pero no incluye las zonas del centro de México, la cual solo considera como zona de invernada (Figura 4 y 5). Debido a las omisiones mencionadas, es importante describir adecuadamente las zonas en las que el tecolote llanero se distribuye actualmente en la región central de México.

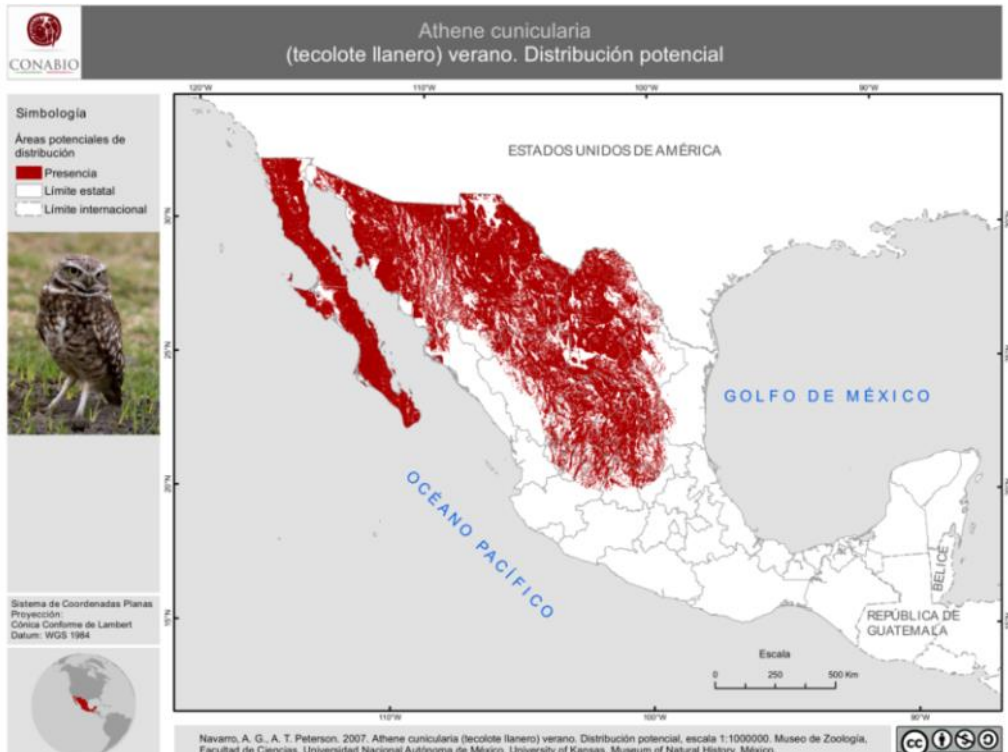


Figura 4. Distribución geográfica potencial en México del tecolote llanero occidental en verano, de acuerdo con Navarro y Peterson (2007).

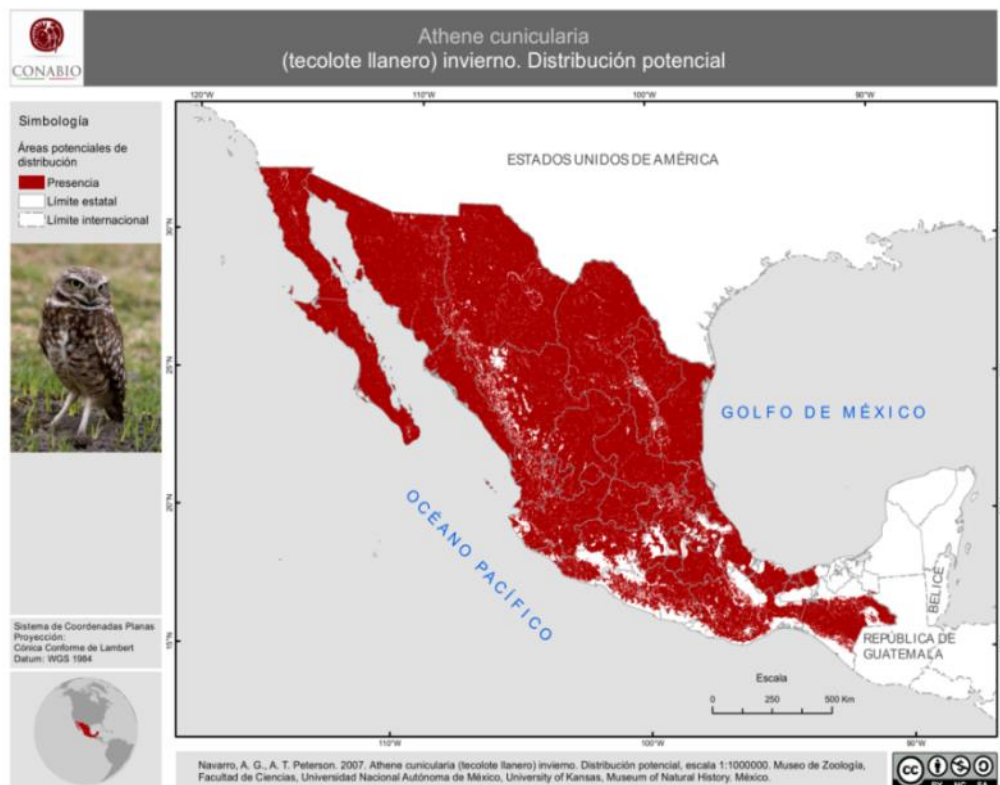


Figura 5. Distribución geográfica potencial en México del tecolote llanero occidental en invierno, de acuerdo con Navarro y Peterson (2007).

Situación actual

Las amenazas más importantes para las poblaciones del tecolote llanero occidental son la pérdida de hábitat, la destrucción de madrigueras por el pisoteo del ganado y maquinaria agrícola y el envenenamiento por pesticidas (COSEWIC, 2006; Environment Canada, 2012; Klute *et al.*, 2003; Rodríguez-Estrella y Granados-Ruiz, 2006).

Por ende, la especie es clasificada bajo diferentes estatus de conservación en los países en los que se distribuye. Así, en Canadá se le considera en peligro de extinción; en Estados Unidos, a nivel federal no tiene estatus de conservación, pero la mitad de los estados en los que se distribuye sí califican a sus poblaciones en peligro (Poulin *et al.*, 2011). En México está contemplada como especie de protección especial por el gobierno federal (NOM-059-SEMARNAT-2010). De acuerdo con Enríquez y Vázquez-Pérez (2015), es muy poca la información de las tendencias poblacionales de los búhos que están enlistados bajo dicha norma.

LITERATURA CITADA

Clements, J. F., T. S. Schulenberg, M. J. Iliff, D. Roberson, T. A. Fredericks, B. L. Sullivan, and C. L. Wood. 2017. The Clements checklist of birds of the world: v2017. Downloaded from <http://www.birds.cornell.edu/clementschecklist/download>.

Commission for Environmental Cooperation. North American Conservation Action Plan (*Athene cucularia hypugaea*). 2005. Commission for Environmental Cooperation. Canada. 55 p.

COSEWIC (Committee on the status of endangered wildlife in Canada). 2006. Assessment and update status report on the burrowing owl *Athene cucularia* in Canada. Committee on the status of endangered wildlife in Canada. 31 p.

Coulombe, H. N. 1971. Behavior and population ecology of the burrowing owl, *Speotyto cucularia*, in the Imperial Valley of California. *The Condor*. 73: 162–176.

Cruz-Carretero, O., and K. McDonnell. 2005. Collaborative efforts to determine wintering grounds and habitat quality for burrowing owls (*Athene cucularia*) in México. *Envirolological Services*. Albuquerque, NM. 31 p.

Engelman, C. A., W. E. Grant, M. A. Mora, and M. Woodin. 2012. Modelling effects of chemical exposure on birds wintering in agricultural landscapes: The western burrowing owl (*Athene cucularia hypugaea*) as a case study. *Ecol. Model.* 224: 90–102.

Enríquez, P. L., K. Eisermann, H. Mikkola. 2012. los búhos de México y Centroamérica : necesidades en investigación y conservación. *Ornitología Neotropical*. 23: 245–258.

Enríquez, P. L., y J. R. Vázquez-Pérez. 2015. Los búhos de México. *In* Los búhos neotropicales: diversidad y conservación. Enríquez, P. L. (ed.). San Cristóbal de Las Casas, Chiapas. El Colegio de la Frontera Sur. pp: 475–509.

Environment Canada. 2012. Recovery strategy for the burrowing owl (*Athene cunicularia*) in Canada. Species at Risk Act Recovery Strategy Series. Environment Canada. 34 p.

Gervais, J. A., D. K. Rosenberg, and L. A. Comrack. 2008. Burrowing owl (*Athene cunicularia*). *In* California Bird Species of Special Concern, Studies of Western Birds No. 1. Shuford W. D. and T. Gardali (Eds). Pp: 218–226.

Gómez de Silva, H. 2006. Área donde coinciden las predicciones GARP de la distribución en México de *Athene cunicularia* hecha con y sin los datos de presencia en localidades climáticamente extremas, escala 1:1000000, México. CONABIO.

Holroyd, G. L., C. J. Conway, and H. E. Trefry. 2011. Breeding dispersal of a burrowing owl from Arizona to Saskatchewan. *Wilson J. Ornithol.* 123: 378–381.

Howell, S. N. G., and S. Webb. 1995. A guide to the birds of Mexico and Northern Central America. Oxford University Press, Nueva York.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2015. Encuesta intercensal.

Klute, D. S., L. W. Ayers, M. T. Green, W. H. Howe, S. L. Jones, J. A. Shaffer, S. R. Sheffield, and T. S. Zimmerman. 2003. Status assessment and conservation plan for the western burrowing owl in the United States. U.S. Department of Interior, Fish and Wildlife Service, Biological Technical Publication FWS/BTO-R6001-2003, Washington, D.C. pp 108.

Lincer, J. L., and P. H. Bloom. 2007. The status of the burrowing owl in San Diego County, California. *In* Proceedings of the California Burrowing Owl Symposium. pp. 90–102.

Macias-Duarte, A. 2011. Change in migratory behavior as a possible explanation for burrowing owl population declines in northern latitudes. The University of Arizona.

Macías-Duarte, A., and C. J. Conway. 2015a. Distributional changes in the western burrowing owl (*Athene Cunicularia hypugaea*) in North America from 1967 to 2008. *J. Raptor Res.* 49: 75–83.

Macías-Duarte, A., and C. J. Conway. 2015b. Spatial patterns in hydrogen isotope ratios in feathers of burrowing owls from western North America. *The Auk.* 132: 25–36.

McDonnell, K., and O. Cruz-Carretero. 2006. Use of radio-telemetry to determine wintering grounds of Burrowing Owls (*Athene cunicularia*). Albuquerque, NM.

Navarro, A. G., y A. T. Peterson. 2007. *Athene cunicularia* (tecolote llanero) invierno. Distribución potencial, escala 1:1000000. Museo de Zoología, Facultad de Ciencias, UNAM, University of Kansas, Museum of Natural History. México.

Poulin, R. G., L. D. Todd, E. A. Haug, B. A. Millsap, and M. S. Martell. 2011. Burrowing Owl (*Athene cunicularia*). *The Birds of North America Online.* 61.

Rodríguez-Estrella, R., and J. B. Granados-Ruiz. 2006. Resident and wintering populations of the burrowing owl (*Athene cunicularia*) in México. *In Current Raptor Studies in Mexico.* Rodríguez-Estrella, R. (ed), Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Pp: 181–201.

SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2010. Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010. *Diario Oficial de la Federación (DOF).* 30 de diciembre de 2010.

Townsend Peterson, A., and A. G. Navarro-Sigüenza. 2006. Hundred-year changes in the avifauna of the Valley of Mexico, Distrito Federal, Mexico. Huitzil. *Revista Mexicana de Ornitología.* 7: 4–14.

CAPÍTULO 1 . DISTRIBUCIÓN POTENCIAL DEL TECOLOTE LLANERO OCCIDENTAL EN EL NORORIENTE DEL VALLE DE MÉXICO

RESUMEN

El tecolote llanero occidental (*Athene cunicularia hypugaea*) tiene una amplia distribución en Norteamérica, pero sus poblaciones han disminuido en el norte en Canadá y Estados Unidos, por lo que se encuentra amenazada, en México se considera como especie de protección especial. El objetivo del estudio fue determinar la distribución potencial del tecolote llanero en el nororiente del Valle de México e identificar las variables ambientales que influyen sobre su presencia. . Se implementó un muestreo en transectos en el área de estudio de enero a julio del 2016. Se usaron variables predictivas climáticas, edafológicas y relativas a los usos de suelo para la construcción de modelos de distribución potencial de regresión logística, regresión lineal y máxima entropía. Las variables climáticas fueron más importantes para predecir la distribución de la especie, mientras que las relacionadas con el uso de suelo e infraestructura humana lo fueron menos. Los modelos seleccionados utilizaron la precipitación del trimestre más cálido, pendiente, temperatura máxima y la proporción de suelos de textura gruesa como variables predictivas en común. La precipitación del trimestre más cálido fue la de mayor importancia, debido probablemente a la relación entre el aumento de la disponibilidad de presas y la temporada de reproducción y de lluvias. Los modelos coincidieron en predecir las mismas zonas de distribución potencial del tecolote, y el modelo de máxima entropía tuvo el mejor desempeño con el conjunto de datos de presencia/ausencia empleados.

Palabras clave: regresión logística, regresión lineal, máxima entropía, precipitación, temperatura, suelos de textura gruesa, pendiente.

INTRODUCCIÓN

La comprensión y descripción de los patrones y procesos ecológicos son clave en la conservación de especies que se encuentran bajo alguna categoría de riesgo (Stevens *et al.*, 2011). Para ello, los modelos de distribución de especies pueden ser usados para comprender las relaciones que hay entre las características ambientales y las especies, y para predecir la distribución de una especie (Elith y Leathwick, 2009). Un modelo de distribución de especies relaciona registros de especies (presencias o abundancias de ciertas localidades) con información de las características espaciales o ambientales de dichos sitios (Elith y Leathwick, 2009).

El tecolote llanero occidental (*Athene cunicularia hypugaea*) tiene una distribución geográfica que abarca el sur de Canadá, oeste de los Estados Unidos y la región centro-norte de México (Holroyd *et al.*, 2001). En los primeros dos, la distribución ha disminuido (Klute *et al.*, 2003), y en los tres países, es clasificada bajo diferentes estatus de conservación (Poulin *et al.*, 2011).

Para su conservación es necesario entender las relaciones de la especie con las características ambientales, además de contar con información sobre su distribución en la zona. La mayoría de los estudios realizados en Estados Unidos y el norte de México sobre la distribución del tecolote llanero y su hábitat han descrito las características ambientales en escalas “locales” o de “microhábitat” (Green y Anthony, 1989; MacCracken *et al.*, 1985; Plumpton y Lutz, 1993; Rodríguez-Estrella y Ortega-Rubio, 1993), pasando por alto los atributos a nivel de paisaje que pueden influir sobre su distribución.

En la región central de México (Estado de México, Ciudad de México e Hidalgo) se han registrado individuos que se asumen como migratorios, mientras que otros pertenecen a poblaciones residentes (Commission for Environmental Cooperation, 2005; Cruz-Carretero y McDonnell, 2005; Holroyd *et al.*, 2011; Macias-Duarte, 2011; Macías-Duarte y Conway, 2015;

McDonnell y Cruz-Carretero, 2006). De acuerdo con Macias-Duarte (2011), dichas poblaciones residentes se encuentran aisladas genéticamente de las que se encuentran en el norte de México y separadas geográficamente por más de 400 km de las mismas. Además se desconocen los límites en la distribución de la especie en esta región.

Por ende, los objetivos de este estudio fueron generar modelos de distribución potencial del tecolote llanero occidental en la región central de México e identificar las variables ambientales que explican su presencia, especialmente en el nororiente del Valle de México, donde se concentran los registros históricos de la especie (Townsend Peterson y Navarro-Sigüenza, 2006).

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El área de estudio se localiza en la región oriental del Estado de México, e incluye fracciones pequeñas de Hidalgo, Tlaxcala y Ciudad de México (Figura 1.1). Comprende una superficie de 339 586 hectáreas, que abarca 63 municipios, de los cuales 44 tienen más de la mitad de su superficie dentro del área de estudio. Está delimitada por 19 microcuencas de la subcuenca hidrológica Pachuca- Ciudad de México (FIRCO - UAQ, 2005) que conforman una zona compacta donde se tienen registros históricos y actuales del tecolote llanero en el Valle de México.

La precipitación anual va de los 459 a 1041 mm, con un promedio de 646 mm (Fernández *et al.*, 2012). La temporada de lluvias se presenta de mayo a octubre, en la época invernal la precipitación corresponde al 5% de la anual. Debido a la orografía, las precipitaciones más altas se presentan en las zonas con mayor elevación y pendiente (Maderey, 1980). La temperatura anual va de los 6.4 a los 17.6 °C, con un promedio de 15.3 °C (Fernández *et al.*, 2012).

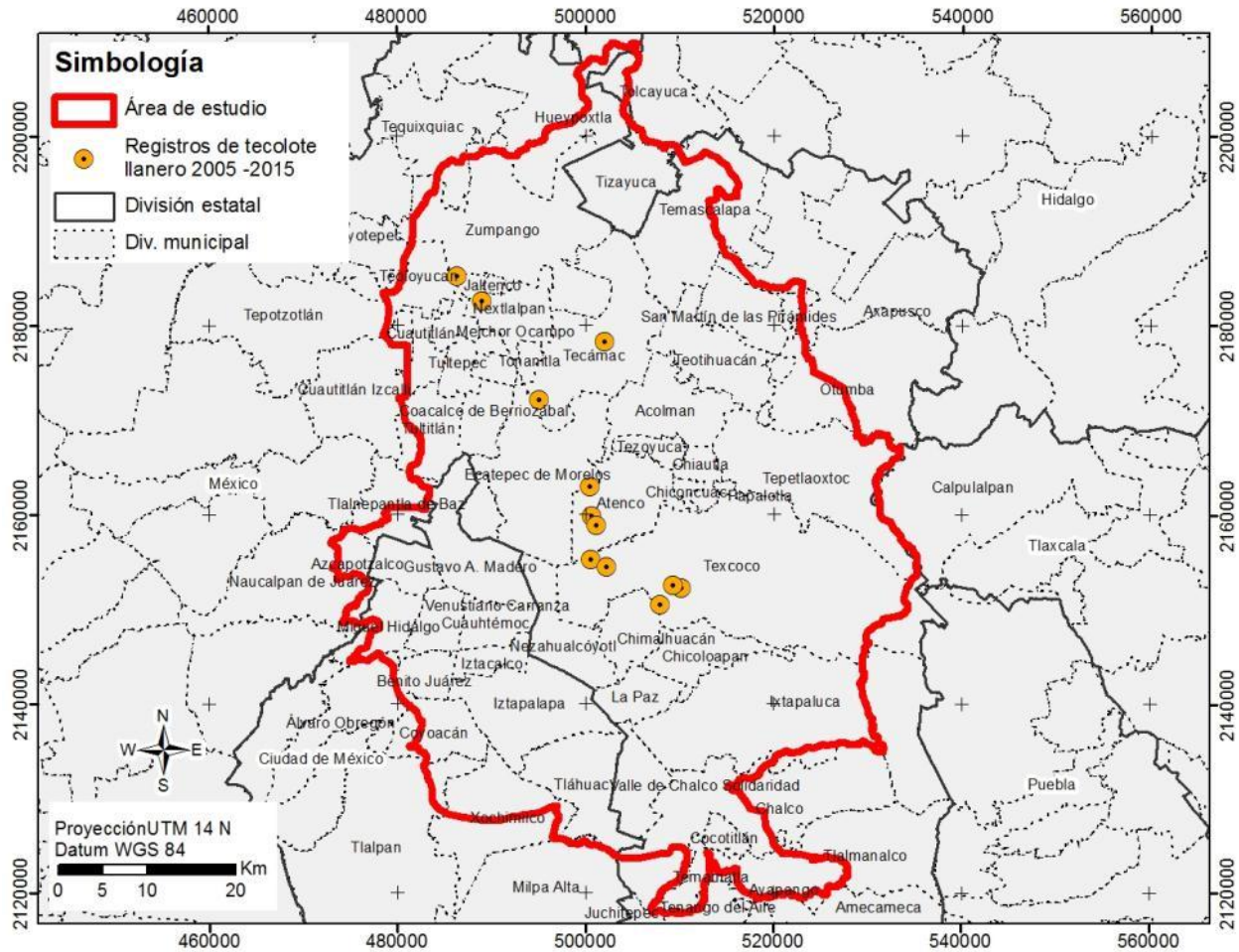


Figura 1.1. División municipal del oriente del Estado de México y demarcación del área de estudio de tecolote llanero (*A. cunicularia*), año 2016.

La zona de estudio ha tenido un fuerte crecimiento poblacional y desarrollo urbano; esto es, existe un flujo migratorio humano de las zonas rurales hacia la zona metropolitana en busca de mejores empleos y oportunidades, lo que ha generado la expansión de la mancha urbana y ha modificado el paisaje (Perevochtchikova, 2009). Por ejemplo, las zonas urbanas de la zona metropolitana de la Ciudad de México se han expandido un 15 % en sobre las áreas de cultivo, pastizales halófilos, vegetación arbustiva y bosques durante la década de 1990 a 2000 (López Vázquez y Plata Rocha, 2009). De acuerdo con INEGI (2013) las áreas agrícolas (de riego y temporal) cubren casi la mitad de la superficie de la zona de estudio (45 %), seguido de las áreas

urbanas (30 %), bosques (10 %) y pastizales (9 %), áreas sin vegetación aparente y matorral (2 % cada una) y cuerpos de agua, tular y vegetación halófila (2 %).

Datos de presencia/ausencia de *Athene cunicularia hypugaea*

Se implementaron transectos de 1 km de longitud por 200 m de ancho, con el objetivo de reunir un mínimo de 40 registros de tecolote llanero, sumando registros incidentales dentro del área de estudio; estudios previos señalan que en modelos de máxima entropía y regresión logística se obtienen resultados aceptables a partir de 25 y 40 registros, respectivamente (Hernandez *et al.*, 2006; Van Proosdij *et al.*, 2016; Wisz *et al.*, 2008; Stockwell y Peterson 2002). Los transectos se recorrieron a pie, a una velocidad promedio de 3 km h⁻¹, desde las 07:30 h y hasta las 11:30 h (aproximadamente 4 horas después del amanecer) y 3 horas antes del atardecer, es decir, aproximadamente de las 17:00 h a las 20:00 h, tiempo durante el cual los tecolotes pasan más tiempo en la entrada de sus nidos (Conway *et al.*, 2006). Debido a la inseguridad pública, en algunas zonas no se recorrieron los transectos después de las 19:00 h.

Los transectos se implementaron en dos etapas; la primera para obtener nuevos registros dentro del área de estudio y la modelación de estos con máxima entropía. La segunda etapa, para obtener una superficie de distribución potencial hacia la cual dirigir muestreo adicional para obtener datos de presencia/ausencia de tecolote llanero.

Primera etapa

Se sobrepuso una retícula (cuadros de 1 km por lado) al mapa de distribución potencial del tecolote llanero de Gómez de Silva (2006); el área de estudio fue cubierta por 1070 cuadros de 1 km². Debido a que el objetivo era encontrar nuevos registros, se seleccionaron 29 cuadrados

orientados hacia las zonas donde no se había reportado la presencia de tecolote llanero. Además, se ubicaron ocho transectos en las zonas donde se había reportado previamente la observación de búhos y en zonas que *a priori*, por el uso de suelo y pendiente del terreno, constituían hábitat potencial de tecolote llanero (Figura 1.2; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

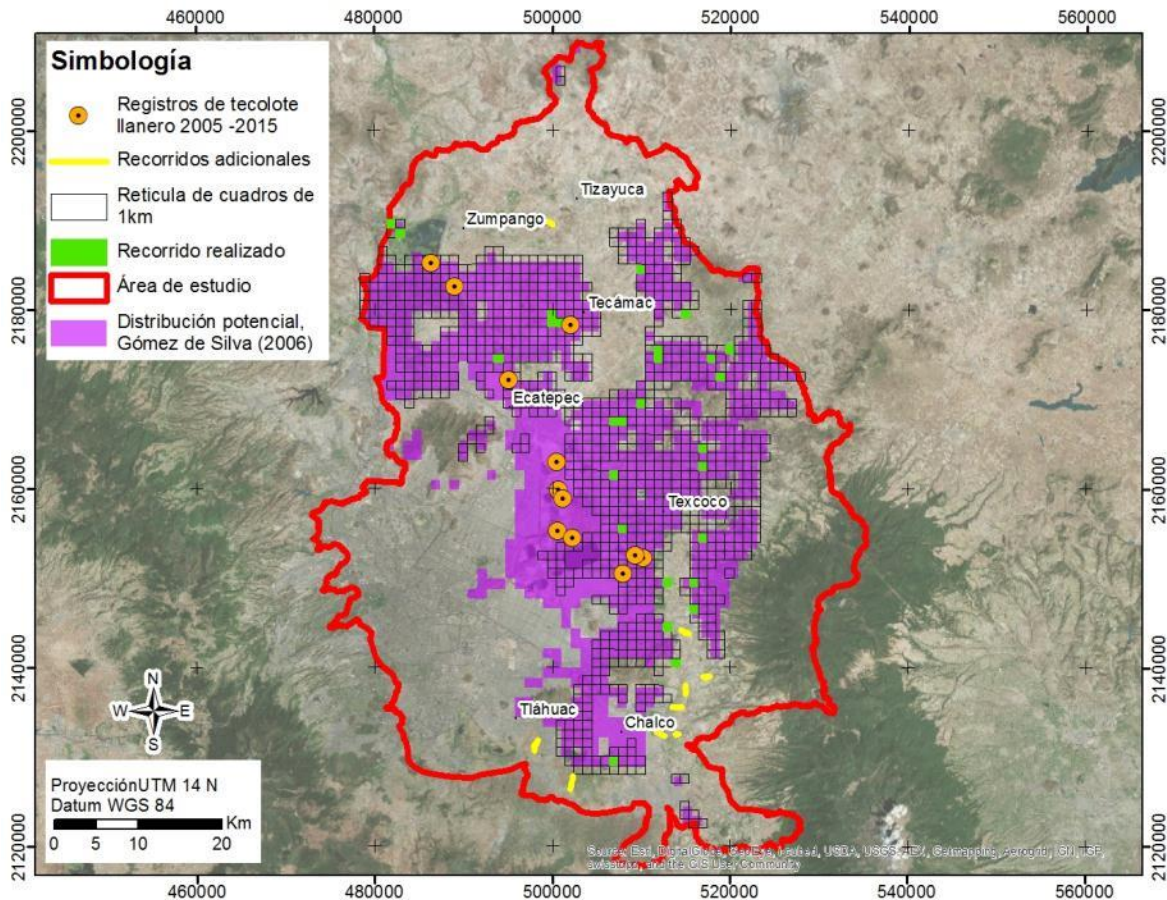


Figura 1.2. Retícula de cuadros de 1 km sobre la distribución potencial del tecolote llanero de acuerdo con Gómez de Silva (2006) y transectos recorridos para determinar la presencia/ausencia del tecolote llanero durante la primera etapa en el nororiente del Valle de México, en 2016.

Segunda etapa

Con registros de literatura (del 2005 al 2015, obtenidos de la revisión de la base de datos NaturaLista y de Cruz-Carretero y McDonnell, 2005) y los obtenidos durante la etapa previa se modeló la distribución potencial con máxima entropía. Sobre la superficie resultante se

sobrepuso la retícula de cuadrados de 1 km², y la superficie con más del 25 % de probabilidad de presencia de tecolote llanero resultó cubierta por 679 cuadrados. De los restantes se seleccionaron unidades aleatoriamente para ubicar transectos hasta conseguir un mínimo de 40 registros. Con los transectos de la primera etapa, se recorrieron 72 transectos dentro de la nueva retícula, que equivalen al 10.6 % de las unidades de la retícula (Figura 1.3; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), y en total se realizaron 89 transectos dentro del área de estudio, generando 41 nuevos registros.

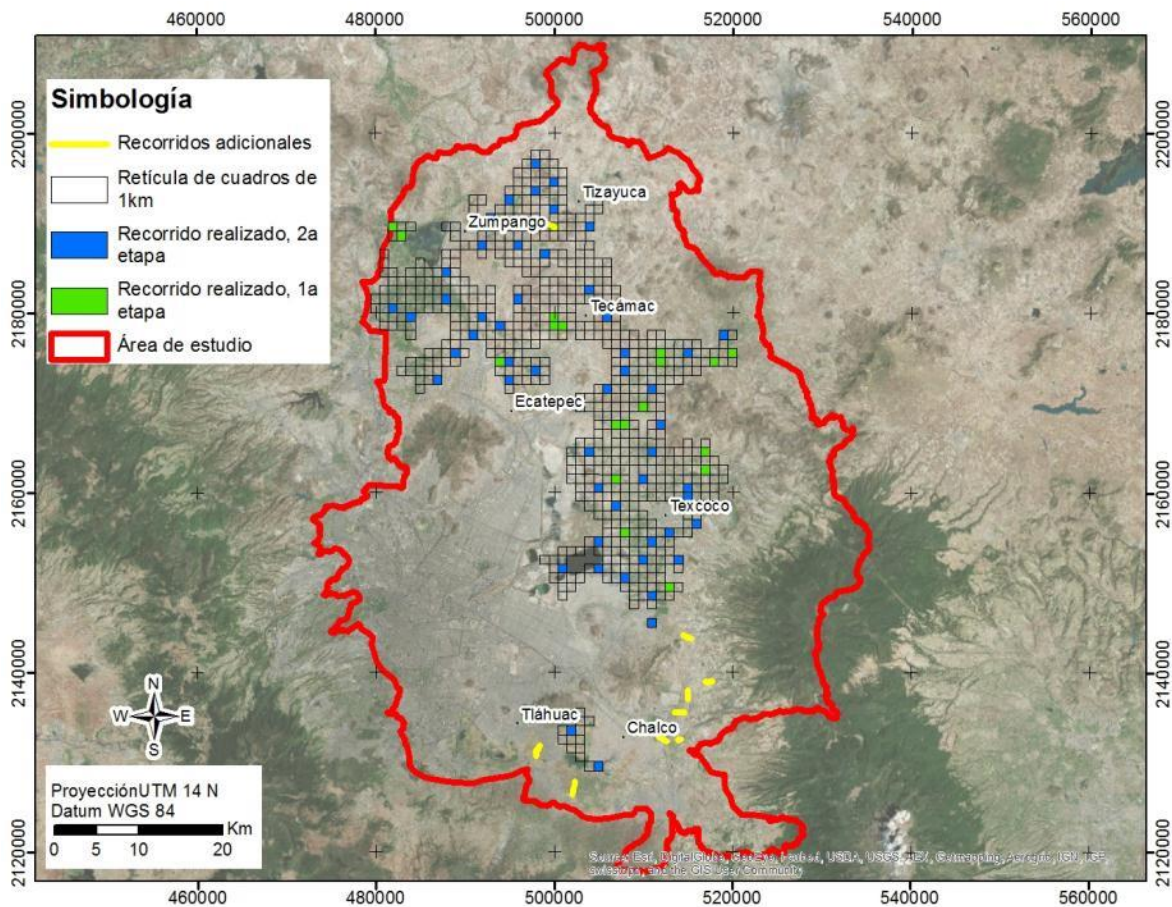


Figura 1.3. Retícula de cuadros de 1 km sobre el área de estudio de acuerdo con el ejercicio de modelación con máxima entropía, y transectos recorridos para corroborar la presencia/ausencia de tecolote llanero durante la primera y segunda etapa en 2016.

Al finalizar el recorrido de los transectos se localizaron las madrigueras de los tecolotes observados, y se corroboró que estas estuvieran activas, mediante la presencia de egagrópilas, plumas o excremento fresco (Crowe y Longshore, 2013); además, se registraron sus coordenadas geográficas con un GPS Garmin Etrex ® 30.

Se consideró como *ausencia* cada transecto donde no se observó al tecolote llanero. Para registrar estos casos se tomaron las coordenadas de acuerdo con la siguiente regla: se dividió el transecto en cinco segmentos; se seleccionó aleatoriamente uno de ellos y, posteriormente, el punto medio del segmento seleccionado. En caso de que el punto de ausencia seleccionado estuviera dentro del radio de 600 m de una madriguera, se seleccionó un segundo punto aleatorio.

Para evitar la pseudoreplicación en la información de las variables predictivas, se tomaron en cuenta únicamente las coordenadas de presencia y ausencia que estuvieron alejadas a más de 600 m unas de otras.

Variables predictivas

Se seleccionaron 28 variables climáticas, edafológicas y de uso de suelo, para tratar de explicar la presencia del tecolote llanero occidental en el área de estudio (Cuadro 1.1). De cada variable se derivó una capa raster con resolución de 30 m por 30 m. Cada pixel contiene, en su caso, el promedio o proporción de la variable dentro de un buffer circular de 600 m de radio, ya que de acuerdo con Gervais *et al.* (2003), Haug y Oliphant (1990) y Rosenberg y Haley (2004) el patrón de movimientos de un tecolote macho se concentra dentro de esa distancia, ya que en una pareja reproductora la hembra permanece la mayor parte del tiempo en el nido.

Las variables pendiente y elevación fueron derivadas del modelo digital de elevaciones con resolución espacial de 30 m de INEGI (2013b) y el uso de la extensión análisis espacial de ArcGis 10.1®.

Los usos del suelo fueron obtenidos mediante una clasificación supervisada, con el método de máxima probabilidad en ENVI 4.7®, a partir de imágenes Landsat 8 del 28 de mayo del 2016. A los usos de suelo y vegetación se agregó la información vectorial de vías de comunicación (conjunto de datos vectoriales de carreteras y vialidades, edición 1.0, INEGI, 2011) y cuerpos de agua (red hidrográfica escala 1:50 000, edición 2.0, INEGI, 2010). A partir de lo anterior, se creó una capa raster que contenían la distancia de cada pixel a caminos, carreteras y zonas urbanas o asentamientos humanos más cercanos (Thiele *et al.*, 2013) y otra con las distancias a los cuerpos de agua, mediante la herramienta análisis espacial de ArcGis 10.1®; si dicha distancia era mayor a 600 m, se registró como 600 m debido a que en ese rango es donde se presenta la mayor actividad del tecolote (Gervais *et al.*, 2003; Haug y Oliphant, 1990; Rosenberg y Haley, 2004).

El tipo de textura del suelo se obtuvo de cartas edafológicas con escala 1:50 000 (INEGI, 1977; INEGI, 1982).

Las variables climáticas se obtuvieron del Atlas Climático Digital de México (Fernández *et al.*, 2012). Se trata de archivos de tipo ráster derivados de la precipitación y temperatura mensuales y anuales de 1902 a 2011, con un tamaño de pixel de 30 arco-segundos (aproximadamente 1 km por 1 km).

Cuadro 1.1. Variables predictivas climáticas, edafológicas y de uso de suelo para la construcción de modelos de distribución potencial de tecolote llanero occidental en el nororiente del Valle de México en 2016.

Variable	Descripción y unidades
Pend	Pendiente promedio del terreno (°)
Elev	Altitud promedio (msnm)
pUrb	Proporción de área urbana
pPast	Proporción de pastizal
pAgr	Proporción de agricultura
dAgua	Distancia promedio a cuerpos de agua (m)
dInfr	Distancia promedio a carreteras e infraestructura humana (m)
pTfina	Proporción de suelos con textura fina
pTmed	Proporción de suelos con textura media
pTgru	Proporción de suelos con textura gruesa
Tanual	Temperatura promedio anual (°C)
Oscd	Oscilación diurna de la temperatura (°C)
Isot	Isotermalidad
EstT	Estacionalidad de la temperatura (°C*100)
Tmax	Temperatura máxima promedio del mes más cálido (°C)
Tmin	Temperatura mínima promedio del mes más frío (°C)
OscA	Oscilación anual de la temperatura (°C)
Tp3ll	Temperatura promedio del trimestre más lluvioso (°C)
Tp3s	Temperatura promedio del trimestre más seco (°C)
Tp3cal	Temperatura promedio del trimestre más cálido (°C)
Tp3fr	Temperatura promedio del trimestre más frío (°C)
Ppanual	Precipitación anual (mm)
Ppml	Precipitación del mes más lluvioso (mm)
Ppms	Precipitación del mes más seco (mm)
EstPp	Estacionalidad de la precipitación
Pp3ll	Precipitación del trimestre más lluvioso (mm)
Pp3s	Precipitación del trimestre más seco (mm)
Pp3cal	Precipitación del trimestre más cálido (mm)
Pp3fr	Precipitación del trimestre más frío (mm)

Construcción y selección del modelo

Para la construcción del modelo se seleccionaron las variables predictoras mediante pruebas de normalidad de Saphiro-Wilk con el procedimiento SAS PROC UNIVARIATE (aunque para los modelos de regresión logística no es necesario el supuesto de normalidad de las variables, su estimación permite elegir las pruebas de significancia y correlación). Posteriormente, se realizaron pruebas de significancia de Wilcoxon y Kruskal-Wallis entre las variables predictoras y la variable respuesta, con el procedimiento SAS PROC NPAR1WAY (SAS Institute Inc., 2016); asimismo, de correlación de Spearman entre las variables predictoras, con el procedimiento SAS PROC CORR (Machicote *et al.*, 2004; SAS Institute Inc., 2016). Si un par de variables estuvieron altamente correlacionados ($r \geq 0.70$) únicamente una de ellas fue integrada para la construcción de un mismo modelo (Green y Anthony, 1989; Thiele *et al.*, 2013).

Modelo de regresión logística

Para modelar la distribución potencial del tecolote llanero occidental se aplicó regresión logística a los datos obtenidos en campo de presencia/ausencia de la especie.

Se crearon 26 modelos con combinaciones de variables de acuerdo a estudios previos y *a priori*, con todas las variables significativas y que no estaban altamente correlacionadas. Los modelos se construyeron con diferente número de variables, desde modelos univariados hasta de cinco variables. También se usó el modelo de regresión logística paso a paso (*stepwise*) y eliminación progresiva (*backward*) para incluir otras combinaciones de variables que no se plantearon. Los modelos se ejecutaron en SAS PROC LOGISTIC (SAS Institute Inc., 2016).

Se usó el criterio de información de Akaike (AIC) y el criterio de información de Akaike corregido (AIC_C) para categorizar los diferentes modelos evaluados de acuerdo al nivel de soporte que tiene cada uno. El AIC_C es recomendado cuando la proporción del número de datos y las variables predictivas es pequeña (Burnham y Anderson, 2002). Además, se calculó la diferencia en el criterio de información de Akaike corregido (ΔAIC_C) entre el modelo con el menor valor de AIC_C y los valores de los demás modelos. Los modelos con un valor de ΔAIC_C menor a 2 tienen mayor soporte para ser los mejores modelos (Burnham y Anderson, 2002). De igual manera, se calculó el peso Akaike (w_i) para evaluar el soporte de cada modelo (Burnham y Anderson, 2002).

Espacialmente, la probabilidad de la presencia del tecolote llanero fue valorada en ArcGis 10.1®, mediante la siguiente fórmula (Keating *et al.*, 2004) y con los estimadores calculados de cada variable de acuerdo al modelo seleccionado:

$$P(y = 1 | x) = \frac{\exp(\beta'x)}{1 + \exp(\beta'x)}$$

Donde P es la probabilidad de presencia de la especie, $\beta' = (\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_p)$ es un vector de coeficientes que relaciona la probabilidad de uso con las variables predictivas (X).

Modelo de regresión lineal

Los modelos de regresión lineal múltiple predicen la respuesta de una variable en función de otras variables predictoras de acuerdo a la siguiente fórmula (Franklin, 2009):

$$\hat{Y} = \hat{\beta}_0 + \sum_{j=1}^p X_j \hat{\beta}_j + \varepsilon$$

Donde β_j es el coeficiente estimador de las variables predictivas (X) y β_0 es la constante denominada intercepto, ε es el término error.

Se utilizaron los mismos modelos creados para la regresión logística, los cuales usaron combinaciones de variables de acuerdo a estudios previos y *a priori*. También se usó el método de selección paso a paso (*stepwise*) y eliminación progresiva (*backward*) para incluir otras combinaciones de variables que no se hayan planteado. Los modelos se ejecutaron con SAS PROC GLM (SAS Institute Inc., 2016).

Los modelos fueron categorizados de acuerdo con el valor de la R^2 ajustada, y se eligió como el mejor aquel que tuviera el valor más alto. Este fue aplicado mediante Sistemas de Información Geográficos a toda el área de estudio para producir un mapa que representara la probabilidad de presencia de tecolote llanero.

Modelo de máxima entropía

El modelo de máxima entropía usado en el software MaxEnt® es un método de *aprendizaje automático* que estima la distribución más uniforme de una especie basado en limitantes ambientales y la información biológica disponible, en este caso las ocurrencias (Phillips *et al.*, 2006). Utiliza únicamente datos de presencia, y genera aleatoriamente puntos de “fondo” o *pseudoausencias* dentro del área de interés (Guillera-Arroita *et al.*, 2014; McFarland *et al.*, 2013).

Se modeló la distribución potencial del tecolote llanero occidental mediante máxima entropía en el programa Maxent® v 3.3.3 y los datos de presencia de la especie en el área de estudio. El objetivo fue construir y elegir un modelo bajo el principio de parsimonia, es decir, aquel con un mejor desempeño y con la menor cantidad de variables predictivas.

En un inicio se construyó un modelo con todas las variables. Mediante una prueba de Jackknife en MaxEnt® se evaluó la importancia de las variables predictoras en los modelos (McFarland *et al.*, 2013; Yost *et al.*, 2008). El modelo se reconstruyó varias veces para descartar, una por una, la variable que cuando fue omitida originó la mayor ganancia de entrenamiento, es decir se eliminó la que aportaba la menor cantidad de información útil en la construcción del modelo (McFarland *et al.*, 2013; Yost *et al.*, 2008).

Se comparó el valor del área bajo la curva (AUC) de cada uno de los modelos construidos, por lo que se eligió el modelo que tuviera un AUC igual al modelo con todas las variables o el de mayor valor en el AUC, además de un traslape en los límites de confianza del 95 % del valor del AUC (McFarland *et al.*, 2013).

Evaluación del modelo

Debido al reducido conjunto de datos de presencia (n=41) y ausencia (n=66) disponible, se ocupó todo el conjunto para realizar la calibración del modelo, mientras que para la evaluación se usó una técnica de *bootstrapping* (Guisan y Zimmerman, 2000). Aunque la evaluación del modelo tiene mejores resultados cuando se realiza con datos de presencia/ausencia nuevos o independientes, cuando no se cuenta con ellos o no es posible obtenerlos se puede realizar una partición de los datos originales para contar con datos de entrenamiento y de prueba (Fielding y Bell, 1997).

Del conjunto de datos de presencia/ausencia de la especie se seleccionaron aleatoriamente 10 subconjuntos diferentes de entrenamiento y de prueba, se mantuvo la proporción de presencias y ausencias del conjunto principal. De acuerdo con Fielding y Bell (1997), el tamaño del subconjunto para la evaluación debe ser $1/(1 + \sqrt{p - 1})$, donde p es el número de variables

predictoras. Dicha fórmula permite elegir de manera óptima el tamaño de los subconjuntos para la construcción y evaluación de modelos que usan datos de presencia/ausencia.

Se evaluó el desempeño del modelo con los subconjuntos de datos de prueba, mediante el estadístico Kappa, el AUC del gráfico característica operativa del receptor (ROC) como sugiere Lantz *et al.* (2007), además de la suma de cuadrados residual. El área bajo la curva del gráfico ROC, se interpreta como la probabilidad de que un dato de presencia sea predicho correctamente sobre una clasificación aleatoria de ausencia (Fielding y Bell 1997). El índice Kappa mide la proporción de ausencias o presencias que son predichos correctamente sobre una clasificación aleatoria. Valores entre 0.4 y 0.75 indican un buen desempeño de los modelos y valores mayores a 0.75 señalan un excelente desempeño de los modelos evaluados (Fielding y Bell 1997).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Mediante los transectos recorridos y los registros incidentales se detectaron 41 madrigueras de tecolote llanero con una distancia entre sí mayor a 600 m. Se seleccionaron 66 puntos de ausencia sobre los transectos donde no se encontró a la especie (Figura 1.4):

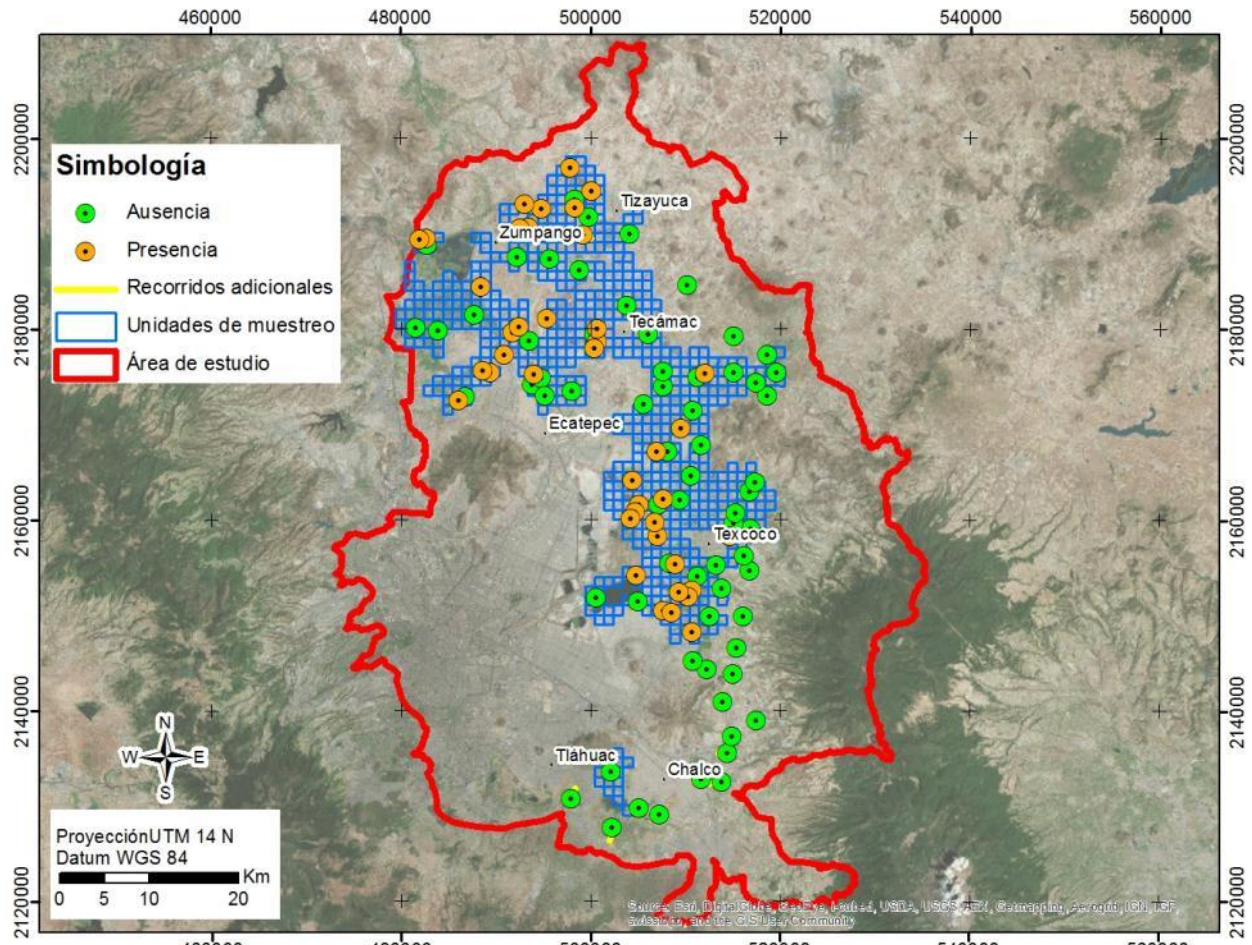


Figura 1.4. Datos de presencia-ausencia de tecolote llanero en el nororiente del Valle de México en 2016.

En el Cuadro 1.2 se presentan los valores de promedio y desviación estándar de cada variable predictiva de acuerdo con la variable de respuesta (presencia/ausencia).

Cuadro 1.2. Comparación de medias, desviación estándar y coeficiente de variación de las variables predictivas climáticas, edafológicas y de uso de suelo en sitios con presencia y ausencia de tecolote llanero en el nororiente del Valle de México, año 2016.

Variable	Presencia N=41			Ausencia N=66		
	Media	Desv. est.	CV†	Media	Desv. est.	CV†
Pend	0.84	0.38	44.94	1.73	1.61	93.10
Elev	2246.85	13.78	0.61	2272.35	43.75	1.93
pUrb	6.10	9.26	151.86	5.44	9.24	169.79
pPast	56.93	20.74	36.43	60.74	23.45	38.61
pAgr	36.24	22.33	61.61	32.39	23.31	71.95
dAgua	470.56	151.65	32.22	487.00	145.07	29.78
dInfr	201.98	130.59	64.66	222.59	145.78	65.49
pTfina	57.27	43.30	75.60	44.35	44.62	100.61
pTmed	42.41	43.03	101.46	50.23	44.14	87.88
pTgru	0.32	2.03	640.31	5.41	17.50	323.46
Tanual	15.90	0.30	1.89	15.61	0.52	3.35
Oscd	17.39	0.54	3.12	17.32	0.77	4.43
Isot	68.95	0.44	0.64	69.12	0.69	1.00
EstT	204.22	4.16	2.04	197.02	8.81	4.47
Tmax	27.10	0.30	1.11	26.92	0.51	1.88
Tmin	1.80	0.46	25.45	1.76	0.72	41.22
OscA	24.88	0.71	2.87	24.64	0.99	4.00
Tp3ll	16.27	0.45	2.76	16.17	0.51	3.18
Tp3s	15.34	0.53	3.45	15.11	0.75	4.94
Tp3cal	17.39	0.49	2.84	17.36	0.57	3.29
Tp3fr	12.98	0.16	1.20	12.92	0.47	3.67
Ppanual	588.44	19.75	3.36	591.09	21.00	3.55
Ppml	121.02	3.99	3.30	119.92	6.98	5.82
Ppms	4.66	0.66	14.08	4.74	0.69	14.47
EstPp	85.17	2.19	2.57	84.76	2.92	3.44
Pp3ll	315.51	15.26	4.84	314.18	19.26	6.13
Pp3s	21.63	1.28	5.92	22.03	1.46	6.61
Pp3cal	179.15	4.70	2.63	185.14	6.67	3.60
Pp3fr	19.61	1.83	9.33	20.09	2.04	10.13

† Coeficiente de variación.

El estadístico obtenido de las variables predictivas falló la prueba de bondad de ajuste de normalidad de Saphiro-Wilk ($p < 0.05$). Sólo 7 variables predictivas presentan diferencias entre los puntos de presencia y ausencia (Cuadro 1.3) de acuerdo con la prueba de Kruskal-Wallis: Pend, Elev, pTgru, Tanual, EstT, Tmax y Pp3cal. Ninguna de las variables relacionadas con el uso de suelo (proporción de pastizales, agricultura, área urbana, distancia a infraestructura urbana, distancia a cuerpos de agua) tuvo relación con la presencia o ausencia del tecolote llanero. Este resultado fue consistente con el de Stevens *et al.* (2011), quienes encontraron que las variables de vegetación, uso de suelo y distancia a los cuerpos de agua tenían un menor poder predictivo para modelar la selección de ámbito hogareño del tecolote llanero. Una posible explicación para esto es que aunque su hábitat natural corresponde a terrenos abiertos y de vegetación dispersa (principalmente pastizales naturales) algunos hábitats modificados cumplen esas características (Klute *et al.*, 2003), como las áreas agrícolas, pastizales cultivados, terrenos baldíos y zonas residenciales.

Cuadro 1.3. Pruebas de normalidad y significancia de las variables predictivas climáticas, edafológicas y de uso de suelo usadas para la construcción de modelos de distribución potencial del tecolote llanero en el nororiente del Valle de México en 2016.

Variable	Saphiro-Wilk		Kruskal-Wallis	
	W	p	Chi-cuadrado	p>chi-cuadrado
Pend†	0.65	0.0001	11.32	0.0008
Elev†	0.72	0.0001	13.71	0.0002
pUrb	0.66	0.0001	0.04	0.8371
pPast	0.97	0.0244	0.98	0.322
pAgr	0.95	0.0007	0.79	0.373
dAgua	0.78	0.0001	0.89	0.3442
dInfr	0.93	0.0001	0.33	0.5663
pTfina	0.77	0.0001	3.58	0.0585

pTmed	0.78	0.0001	1.63	0.2022
pTgru†	0.27	0.0001	3.87	0.0492
Tannual†	0.61	0.0001	10.56	0.0012
Oscd	0.77	0.0001	0.01	0.9326
Isot	0.76	0.0001	1.69	0.193
EstT†	0.91	0.0001	16.56	0.0001
Tmax†	0.61	0.0001	3.87	0.0491
Tmin	0.77	0.0001	0.66	0.4155
OscA	0.87	0.0001	1.33	0.2495
Tp3ll	0.65	0.0001	0.89	0.3445
Tp3s	0.79	0.0001	2.34	0.1262
Tp3cal	0.71	0.0001	0.06	0.8079
Tp3fr	0.52	0.0001	0.55	0.4564
Ppannual	0.89	0.0001	0.66	0.4173
Ppml	0.97	0.0109	2.77	0.0962
Ppms	0.78	0.0001	0.34	0.56
EstPp	0.95	0.0011	0.76	0.3821
Pp3ll	0.91	0.0001	1.15	0.2827
Pp3s	0.93	0.0001	2.80	0.0944
Pp3cal†	0.96	0.0058	20.88	0.0001
Pp3fr	0.93	0.0001	1.58	0.2087

† Variables significativas.

Entre las variables significativas sólo hay correlación negativa entre EstT y Pp3cal ($r=-0.81$, $p=<0.0001$, Cuadro 1.4), por lo que se pudieron usar éstas dos variables dentro de un mismo modelo propuesto.

Cuadro 1.4. Coeficientes de correlación de Spearman entre las variables predictivas climáticas y edafológicas usadas para la construcción de modelos de distribución potencial del tecolote llanero en el nororiente del Valle de México en 2016.

	Pend	Elev	pTgru	Tanual	EstT	Tmax	Pp3cal
Pend	1	0.53	0.36	-0.41	-0.38	-0.53	0.41
		<.0001	0.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001
Elev	0.53	1	0.16	-0.66	-0.31	-0.28	0.35
	<.0001		0.102	<.0001	0.0011	0.003	0.0003
pTgru	0.36	0.16	1	-0.15	-0.19	-0.28	0.16
	0.0001	0.102		0.1146	0.0501	0.0031	0.0935
Tanual	-0.41	-0.66	-0.15	1	0.37	0.44	-0.40
	<.0001	<.0001	0.1146		<.0001	<.0001	<.0001
EstT	-0.38	-0.31	-0.19	0.37	1	0.51	-0.81
	<.0001	0.0011	0.0501	<.0001		<.0001	<.0001
Tmax	-0.53	-0.28	-0.28	0.44	0.51	1	-0.54
	<.0001	0.003	0.0031	<.0001	<.0001		<.0001
Pp3cal	0.41	0.35	0.16	-0.40	-0.81	-0.54	1
	<.0001	0.0003	0.0935	<.0001	<.0001	<.0001	

Modelo de Regresión Logística

El análisis con el criterio de información de Akaike corregido muestra seis modelos que tienen un buen soporte ($\Delta AIC_C < 2$, Cuadro 1.5), los cuales emplean todas las variables. El mejor modelo seleccionado incluye la pendiente, temperatura máxima, proporción de suelos con textura gruesa y la precipitación del trimestre más cálido ($\omega_i = 0.16$).

Cuadro 1.5. Categorización de modelos de regresión logística propuestos para la distribución potencial de tecolote llanero en el nororiente del Valle de México, de acuerdo al criterio de información de Akaike (AIC), año 2016.

Modelo	AIC	AIC _C	Δ AIC _C	ω_i
Pend+Tmax+pTgru+Pp3cal	115.87	116.46	0.00	0.16
Elev+Pp3cal+pTgru	116.37	116.76	0.30	0.14
Pend+Tmax+Pp3cal [†]	116.61	117.00	0.54	0.13
Pend+pTgru+Tanual+Tmax+Pp3cal	116.52	117.36	0.90	0.11
Elev+Pp3cal [¶]	117.22	117.46	1.00	0.10
Pend+pTgru+Elev+Pp3cal+Tmax+EstT	117.20	118.33	1.87	0.06
Pend+Pp3cal	118.91	119.14	2.68	0.04
Elev+Tanual+Pp3cal	119.11	119.50	3.04	0.04
Pp3cal+Elev+Tanual	119.11	119.50	3.04	0.04
Pend+pTgru+EstT+Pp3cal	119.49	120.09	3.63	0.03
pTgru+Pp3cal+EstT+Pend	119.49	120.09	3.63	0.03
Elev+pTgru+Tanual+Pp3cal+EstT	119.41	120.25	3.79	0.02
Pend+pTgru+Elev+Tanual+Tmax+Pp3cal+EstT	118.84	120.31	3.85	0.02
Pend+pTgru+Tanual+Pp3cal	119.92	120.51	4.05	0.02
pTgru+Pp3cal	120.97	121.20	4.74	0.02
Tmax+Pp3cal+pTgru	120.82	121.21	4.75	0.02
Tanual+Pp3cal	121.72	121.95	5.49	0.01
Pp3cal+EstT	122.90	123.13	6.67	0.01
Pp3cal	123.22	123.33	6.87	0.01
EstT	123.69	123.80	7.34	0.00
Elev+pTgru	127.36	127.60	11.14	0.00
Elev	128.70	128.82	12.36	0.00
Pend	128.71	128.83	12.37	0.00
Pend+pTgru	128.69	128.93	12.46	0.00
Tanual	135.46	135.58	19.12	0.00
pTgru	140.51	140.63	24.17	0.00
Tmax	142.44	142.55	26.09	0.00

[†] Combinación de variables seleccionada mediante el método *eliminación hacia atrás*,[¶] Combinación de variables seleccionada mediante el método *paso a paso*.

Las probabilidades de la presencia de tecolote llanero (observadas mediante la razón de *odds*) disminuyen al aumentar una unidad en todas las variables (Cuadro 1.6): 68 % al aumentar la pendiente, 83 % al aumentar la temperatura máxima, 6 % al aumentar la proporción de suelos de textura gruesa y 18 % al aumentar la precipitación del trimestre más cálido.

Cuadro 1.6. Coeficientes de las variables, error estándar, probabilidades y límites de confianza al 95% de las variables predictivas en el modelo de regresión logística Pend+Tmax+Ptgru+Pp3cal para la distribución del tecolote llanero en el nororiente del Valle de México en 2016.

Parámetro	Coeficiente	Error estándar	Razón de <i>odds</i>	Límites de confianza al 95%		
Intercepto	85.13	28.89	-	-	-	-
Pend	-1.13	0.50	0.32	0.11	0.78	
Tmax	-1.80	0.82	0.17	0.03	0.79	
pTgru	-0.06	0.06	0.94	0.77	1.01	
Pp3cal	-0.20	0.05	0.82	0.73	0.91	

Las curvas de respuesta señalan a la temperatura máxima y la precipitación del trimestre más cálido como las variables con las que la probabilidad de presencia es cercana a 1, pero la probabilidad disminuye al aumentar a más de 24 °C y más de 150 mm en la precipitación (Figura 1.5):

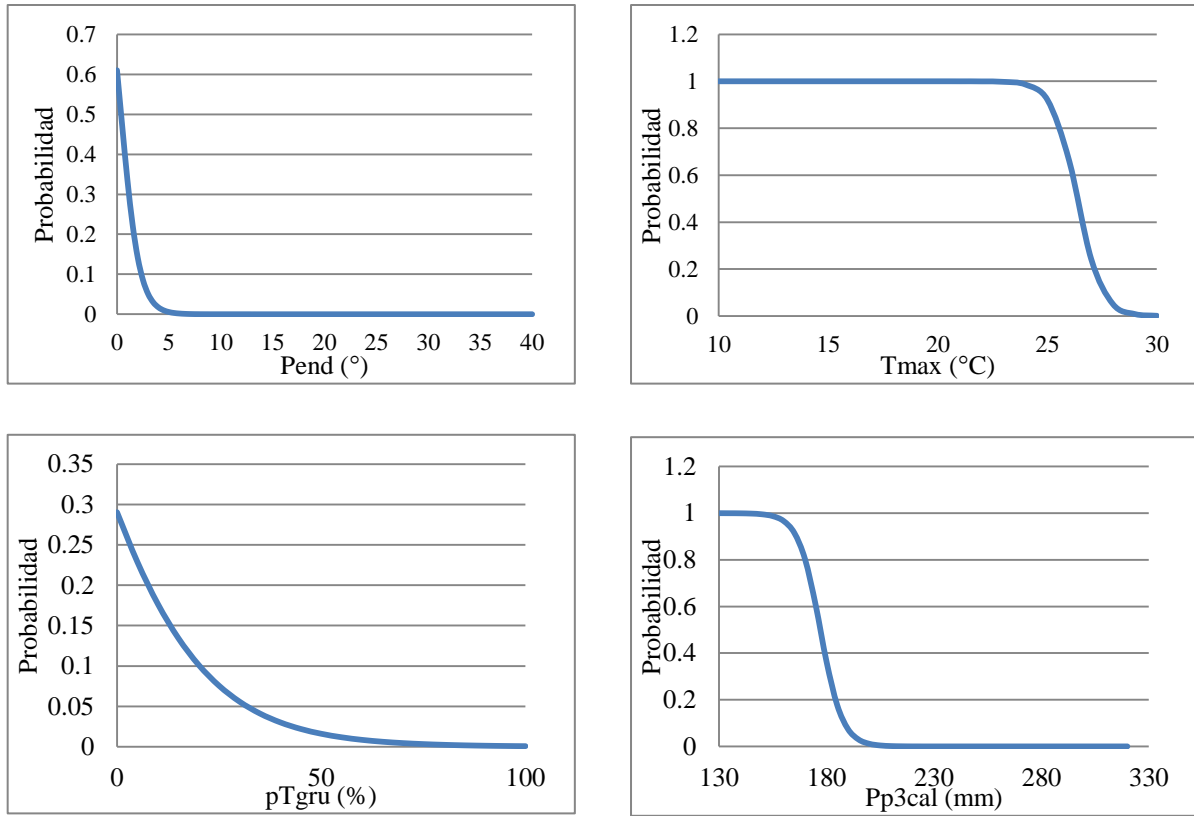


Figura 1.5. Curvas de respuesta de cada una de las variables predictivas que componen el modelo de Regresión Logística Pend+Tmax+Ptgru+Pp3cal para la distribución del tecolote llanero en el nororiente del Valle de México en 2016.

La superficie que tiene una probabilidad de presencia de tecolote llanero occidental mayor a 0.5 es de 53 893.8 ha, lo cual corresponde al 15.8% de la superficie total del área de estudio (Figura 1.6).

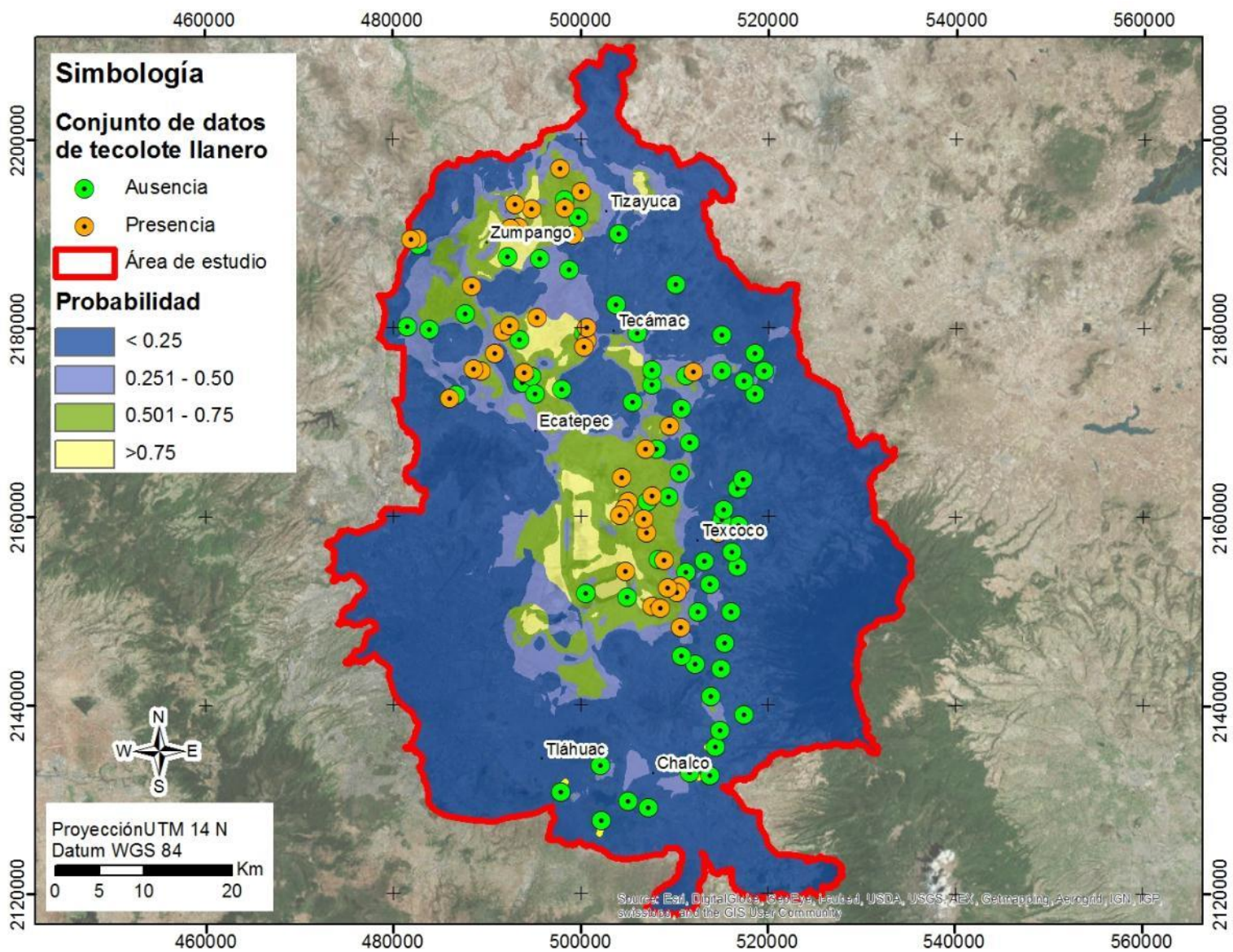


Figura 1.6. Probabilidad de presencia de tecolote llanero occidental en el nororiente del Valle de México, de acuerdo con el modelo de regresión logística $P_{end} + T_{max} + P_{tgru} + P_{p3cal}$ y datos de presencia/ausencia del 2016.

Modelo de Regresión Lineal

De acuerdo con el estadístico de la R^2 ajustada, el modelo que mejor se ajusta para explicar la presencia de tecolote llanero se compone de las siguientes cinco variables: pendiente, proporción de suelos con textura gruesa, temperatura anual, temperatura máxima y precipitación del trimestre más cálido (Cuadro 1.7). El método de selección de eliminación hacia atrás y paso a paso produjeron combinaciones ya propuestas.

Cuadro 1.7. Categorización de modelos de regresión lineal propuestos para la distribución potencial en el nororiente del Valle de México del tecolote llanero en 2016 de acuerdo al valor de R^2 ajustada.

Combinación de variables	R^2	R^2 ajustada
Pend+pTgru+Tanual+Tmax+Pp3cal	0.259	0.224
Pend+pTgru+Elev+Tanual+Tmax+Pp3cal+EstT	0.272	0.221
Pend+Tmax+Pp3cal†	0.228	0.216
Pend+pTgru+Elev+Pp3cal+Tmax+EstT	0.258	0.213
Pend+Tmax+pTgru+Pp3cal	0.241	0.213
Elev+pTgru+Tanual+Pp3cal+EstT	0.242	0.205
Pend+pTgru+Tanual+Pp3cal	0.231	0.202
Elev+Pp3cal+pTgru	0.222	0.202
pTgru+Pp3cal+EstT+Pend	0.229	0.201
Tanual+Pp3cal	0.213	0.200
Pend+pTgru+EstT+Pp3cal	0.229	0.200
Tmax+Pp3cal+pTgru	0.218	0.197
pTgru+Pp3cal	0.210	0.196
Elev+Pp3cal¶	0.208	0.196
Pp3cal+Elev+Tanual	0.216	0.195
Pp3cal+EstT	0.208	0.195
Elev+Tanual+Pp3cal	0.216	0.195
Pend+Pp3cal	0.206	0.192

Pp3cal	0.194	0.187
EstT	0.186	0.180
Elev+pTgru	0.131	0.117
Elev	0.111	0.104
Pend+pTgru	0.117	0.102
Pend	0.102	0.095
Tanual	0.094	0.087
Tmax	0.036	0.029
pTgru	0.032	0.024

† Combinación de variables seleccionada mediante el método *eliminación hacia atrás*,[†]
 Combinación de variables seleccionada mediante el método *paso a paso*.

Los coeficientes de cada una de las variables que construyen el modelo se presentan en el Cuadro 1.8. Con la temperatura anual, a partir de los 14 °C, por cada °C que aumenta, las probabilidades de presencia de tecolote llanero aumentan un 16 %. A partir de 0° de pendiente, por cada unidad que aumenta, la probabilidad disminuye y en los 8° la probabilidad es casi nula. En los suelos de textura gruesa, el aumento de una unidad en la proporción significa menos del 1 % de disminución de la probabilidad, y es nula cuando el suelo tiene 90 % de textura gruesa. Para la temperatura máxima, a partir de los 24 °C la probabilidad disminuye 26 % por cada °C que aumenta, y al aumentar 1 mm de precipitación en el trimestre más cálido a partir de 160 mm la probabilidad disminuye 3 %. La temperatura anual, temperatura máxima y precipitación del trimestre más cálido son las variables predictivas en las que la probabilidad es cercana a 1 (Figura 1.7).

Cuadro 1.8. Coeficientes de las variables predictivas en el mejor modelo de regresión lineal múltiple $P_{end}+pT_{gru}+T_{anual}+T_{max}+Pp3cal$, para la distribución del tecolote llanero en el nororiente del Valle de México, en 2016.

Parámetro	Estimador	Error estándar
Intercepto	10.59	4.53
Pend	-0.06	0.04
pTgru	-0.00	0.00
Tanual	0.16	0.10
Tmax	-0.26	0.13
Pp3cal	-0.03	0.01

La superficie con una probabilidad de presencia de tecolote llanero occidental mayor a 0.5 es de 60 754.3 ha, que corresponde al 17.9 % de la superficie total del área de estudio (Figura 1.8).

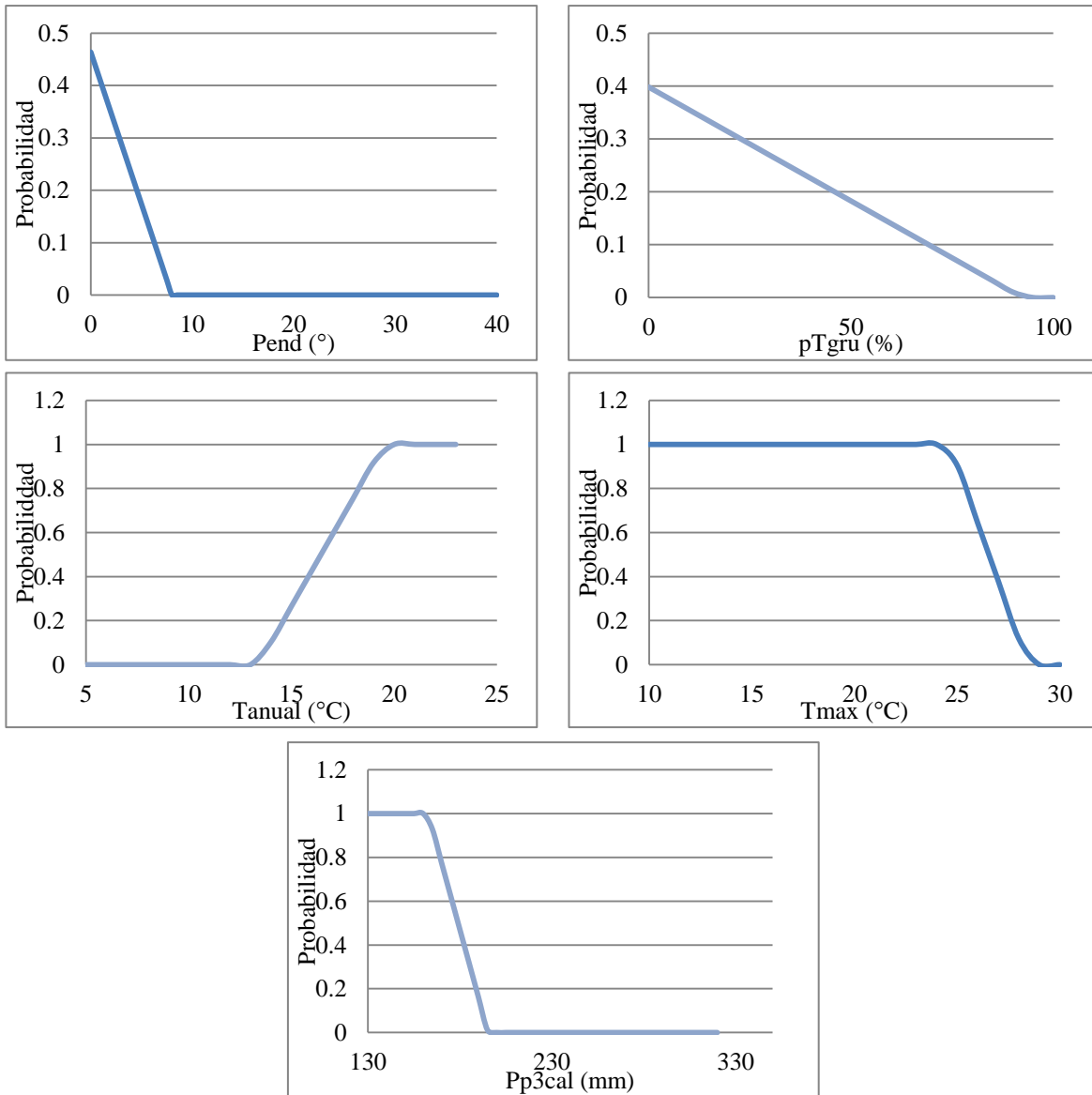


Figura 1.7. Curvas de respuesta de cada una de las variables predictivas en el modelo de regresión lineal $Pend+pTgru+Tanual+Tmax+Pp3cal$ con respecto a la probabilidad de presencia de tecolote llanero occidental en el nororiente del Valle de México en 2016.

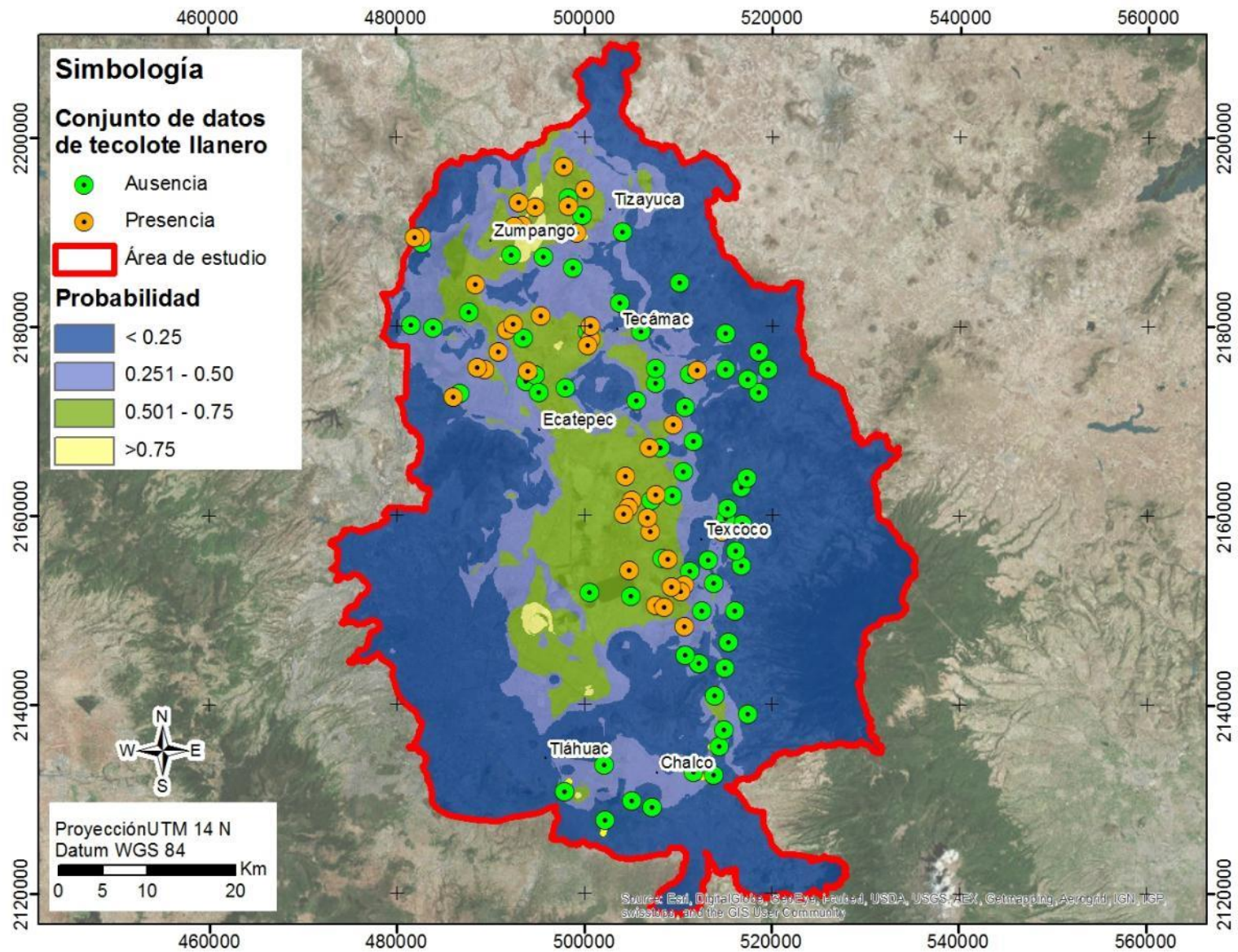


Figura 1.8. Probabilidad de presencia de tecolote llanero occidental en el nororiente del Valle de México de acuerdo al modelo de regresión lineal con las variables $Pend+pTgru+Tannual+Tmax+Pp3cal$ y datos de presencia/ausencia del 2016.

Modelo de máxima entropía

De acuerdo con la prueba de Jackknife el modelo con todas las variables tiene una ganancia en el entrenamiento de 1.09. La variable más importante (de acuerdo con la ganancia de entrenamiento cuando se modela únicamente una variable a la vez) es la precipitación del trimestre más cálido, seguida de la estacionalidad de la temperatura y la pendiente (Figura 1.9). La precipitación del trimestre más cálido presenta el mayor decrecimiento en la ganancia de entrenamiento cuando es omitida del modelo, lo que indica que de todas las variables esta contiene la mayor cantidad de información. La variable con el menor decrecimiento al excluirla del modelo es la elevación, lo que indica que es la variable con menor importancia en el modelo inicial (Figura 1.9).

Por consiguiente, las variables fueron eliminadas en el siguiente orden para la construcción de los modelos: Elev, Tanual, EstT, pTgru, Tmax (Cuadro 1.9). Con el criterio del traslape en los límites de confianza al 95 % sobre el valor del área bajo la curva (AUC) de cada uno de los modelos, se seleccionó el segundo modelo que contiene seis variables: Pend+Pp3cal+Tmax+pTgru+EstT+Tanual.

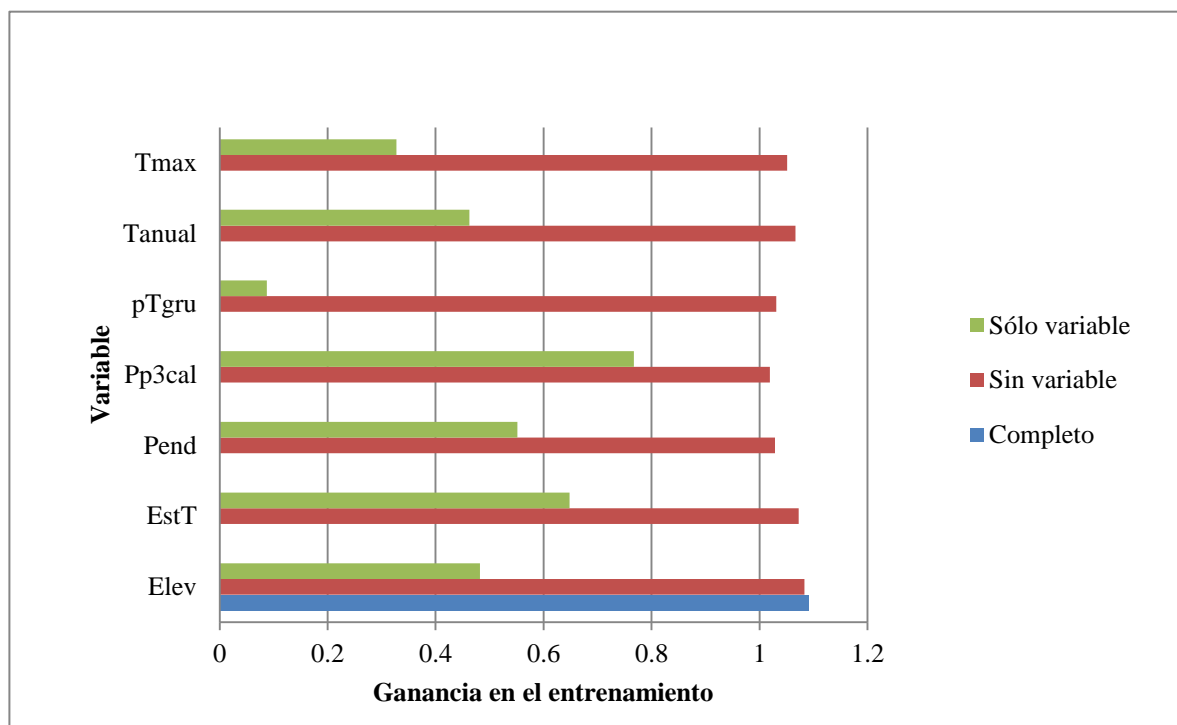


Figura 1.9. Prueba de importancia de Jackknife en la ganancia de entrenamiento en el modelo inicial de máxima entropía con todas las variables para la distribución potencial de tecolote llanero occidental en el nororiente del Valle de México en 2016.

Cuadro 1.9. Construcción de modelos de máxima entropía de acuerdo a la omisión de variables predictivas por el menor decrecimiento en la ganancia de entrenamiento con la prueba de Jackknife para la distribución potencial del tecolote llanero en el nororiente del Valle de México en 2016.

MODELOS	Media de la ganancia de entrenamiento	LC al 95%	Variable eliminada
1) Pend+Pp3cal+Tmax+pTgru+EstT+Tanual+Elev	0.889	0.887 0.891	-
2) Pend+Pp3cal+Tmax+pTgru+EstT+Tanual	0.887	0.885 0.889	Elev
3) Pend+Pp3cal+Tmax+pTgru+EstT	0.885	0.883 0.887	Tanual
4) Pend+Pp3cal+Tmax+pTgru	0.880	0.878 0.881	EstT
5) Pend+Pp3cal+Tmax	0.872	0.870 0.874	pTgru
6) Pend+Pp3cal	0.853	0.851 0.855	Tmax

En la Figura 1.10 se revela como la probabilidad de presencia de la especie fue afectada de acuerdo con los valores de las variables predictivas que componen el modelo. Todas las variables tuvieron una probabilidad de presencia de entre 0.5 y 0.7, a excepción de la precipitación del trimestre más cálido que tuvo un valor cercano a 1. Pendientes entre 0 y 1° presentaron la mayor probabilidad de presencia de tecolote llanero; cuando la pendiente fue mayor a 8°, la probabilidad de presencia fue nula. En el caso de la precipitación del trimestre más cálido, la mayor probabilidad se presentó cuando la lluvia fue menor a 160 mm, pero al aumentar a más de 220 mm la probabilidad fue nula. Al aumentar la proporción de suelos con textura gruesa, la probabilidad disminuyó a 0. Con respecto a la temperatura anual, la probabilidad aumentó a partir de los 6 °C hasta llegar a un máximo alrededor de los 16 °C, pero a los 17 °C la probabilidad fue nula. La probabilidad fue la misma conforme aumentó la temperatura máxima, pero al pasar de los 27 °C disminuyó hasta acercarse a 0. La estacionalidad de la temperatura mostró que entre mayor fue la variabilidad de la temperatura en el área, mayor fue la probabilidad de presencia de tecolote llanero.

La superficie con una probabilidad de presencia de tecolote llanero occidental mayor a 0.5 fue de 47 105.4 ha, que corresponde al 13.8 % de la superficie del área de estudio (Figura 1.11).

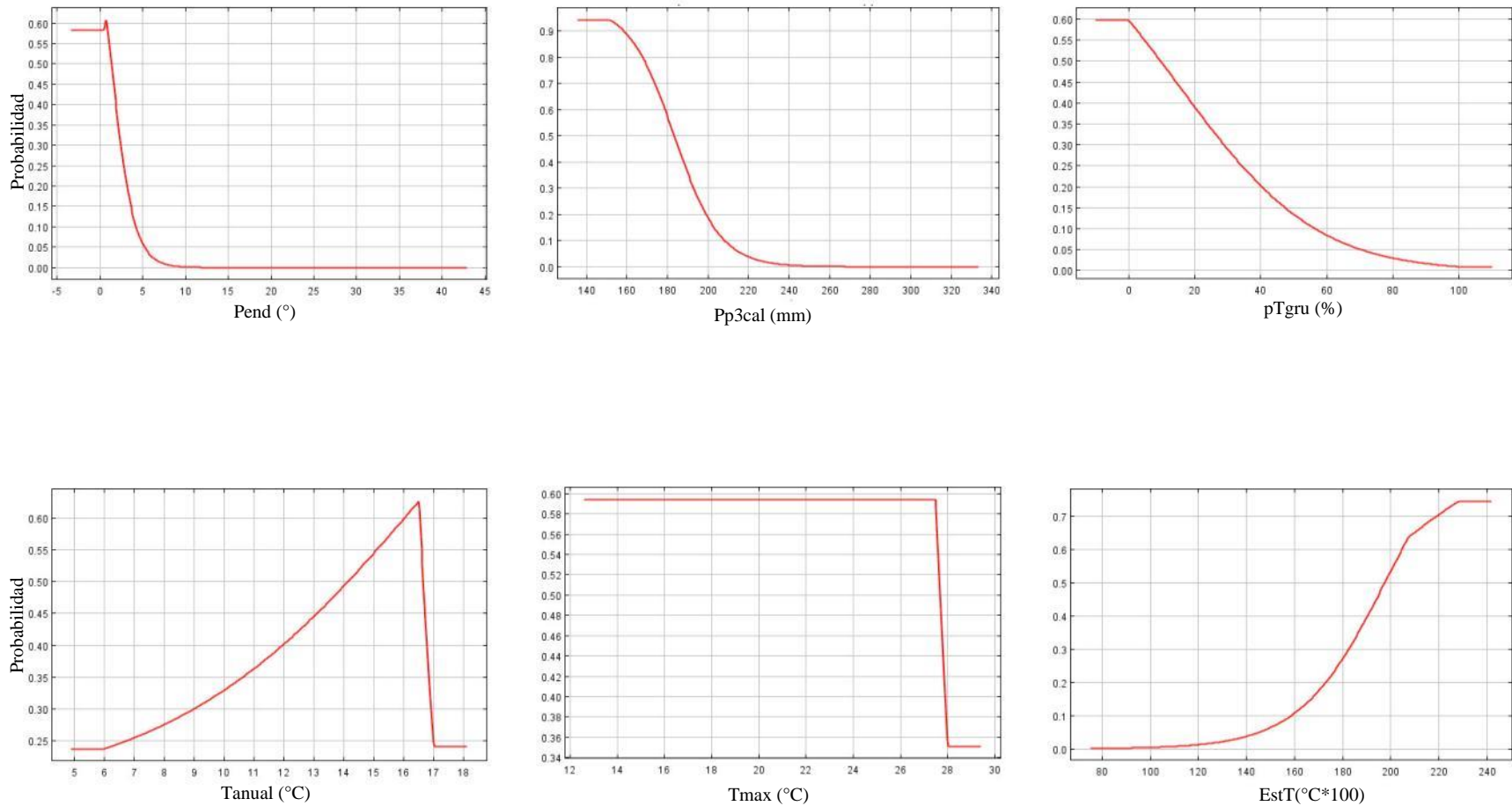


Figura 1.10. Curvas de respuesta de cada una de las variables predictivas en el modelo de máxima entropía $Pend+Pp3cal+pTgru+Tanual+Tmax+EstT$, con respecto a la probabilidad de presencia de tecolote llanero occidental en el nororiente del Valle de México en 2016.

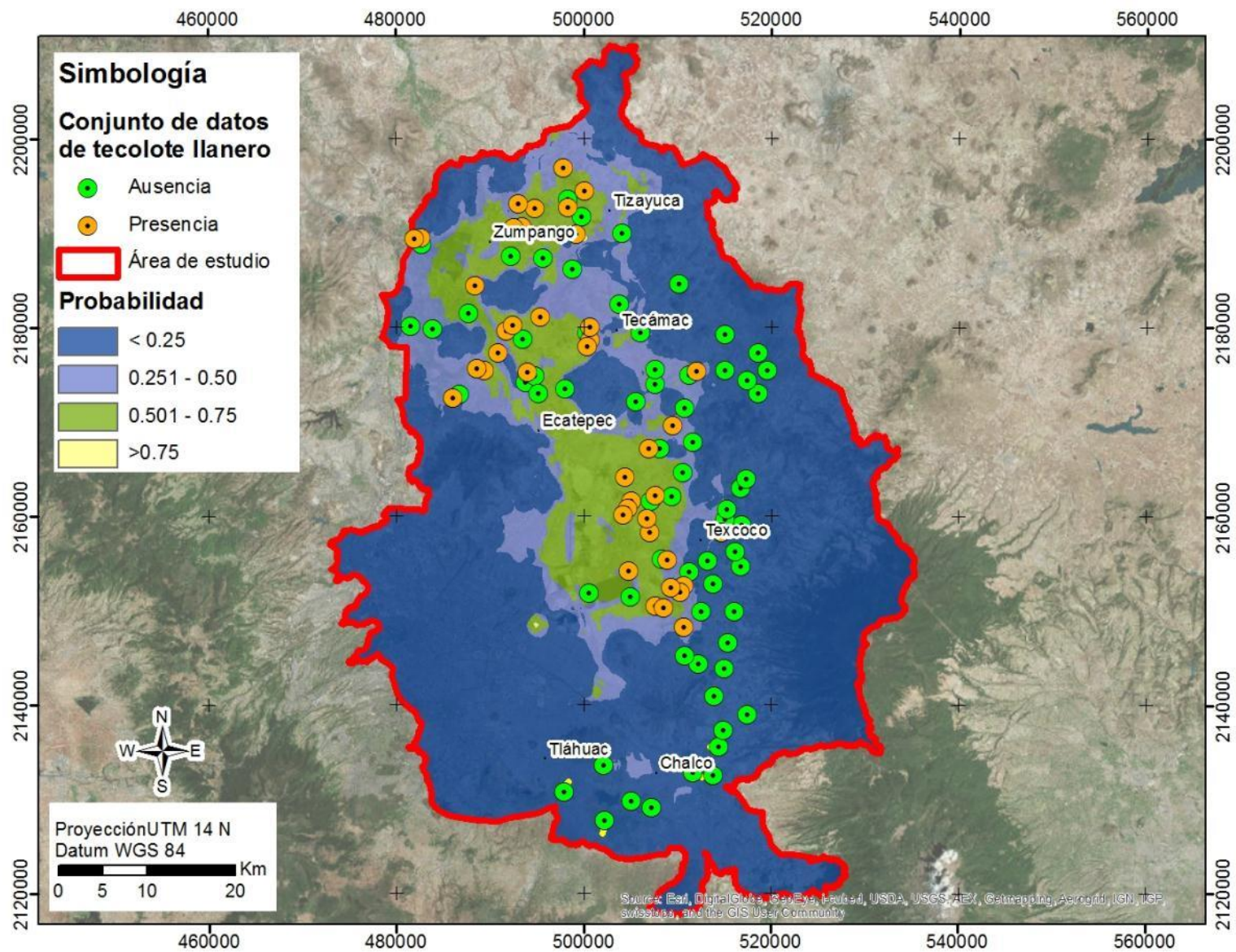


Figura 1.11. Predicciones de probabilidad de presencia del tecolote llanero occidental (*Athene cunicularia hypugaea*) en el nororiente del Valle de México calculadas mediante el modelo de máxima entropía con base en las variables $Pend+Pp3cal+Tmax+pTgru+EstT+Tanual$ y datos de presencia/ausencia recolectados en 2016.

Diversos estudios señalan a las variables climáticas como los principales factores que influyen en la distribución de las especies (Guisan y Hofer, 2003; Stevens *et al.*, 2011). Los tres modelos generados señalaron a la precipitación del trimestre más cálido (abril, mayo y junio) como una de las variables más importantes para predecir la presencia del tecolote llanero. La relación entre la precipitación del trimestre más cálido y el tecolote llanero se puede explicar con la temporada de reproducción de la especie, que se presenta de mediados de abril a mediados de octubre (Poulin *et al.*, 2011): durante la temporada de lluvias hay un aumento en la disponibilidad de presas (Silva-Porto y Cerqueira, 1990), lo cual es un factor importante para asegurar el éxito de las nidadas (Haley y Rosenberg, 2013; Wellicome *et al.*, 2013).

Los modelos de regresión lineal y logística también incluyeron a la temperatura máxima entre las variables que más influyeron sobre la distribución de la especie. Sin embargo, cuando en cada modelo (regresión logística, lineal y de máxima entropía) se incluyó una sola variable, la temperatura máxima estuvo entre las de menor poder predictivo (Cuadro 1.5, Cuadro 1.7, Figura 1.9). Lo anterior se puede explicar debido a una relación negativa entre el aumento de la temperatura y el comportamiento de la especie. Por ejemplo, Fisher *et al.* (2004) y Fisher *et al.* (2015) encontraron que temperaturas más cálidas afectan el comportamiento del tecolote llanero en la defensa de sus madrigueras y, por lo tanto, la aptitud de la especie. Por otra parte, Butts y Lewis (1982) mencionan que altas temperaturas limitan las actividades de la especie durante el día.

Indirectamente las características de los suelos influyen sobre la disponibilidad de madrigueras, lo cual es importante para el tecolote llanero (Coulombe, 1971). Los suelos de textura gruesa evidenciaron una relación negativa sobre la presencia de tecolote llanero en el

área de estudio. Por el contrario, Stevens *et al.* (2011) encontraron que los tecolotes llaneros prefieren suelos con textura gruesa sobre los de textura fina. Sin embargo, MacCracken, *et al.* (1985) encontraron que las madrigueras del tecolote en Dakota del Sur eran de textura franco arcillo limosos y en Durango, Rodríguez-Estrella y Ortega-Rubio (1993) encontraron madrigueras con textura arcillo-arenosa. Larson (2009) detectó una correlación negativa entre la temperatura y los suelos de textura gruesa asociada a la presencia del tecolote llanero, sin embargo, concluyó que la primera variable no estaba entre los factores principales en la selección de madrigueras.

De acuerdo con los modelos obtenidos en el presente estudio, las pendientes bajas se relacionan con la presencia de la especie, en congruencia con lo planteado por otras investigaciones que afirman que las madrigueras de los tecolotes llaneros suelen localizarse en terrenos planos o poco escarpados (Butts y Lewis, 1982; Rich, 1986).

En general, los tres modelos aplicados coinciden en la forma y ubicación de las áreas de distribución potencial del tecolote llanero. El modelo de máxima entropía generó la menor superficie potencial (47 105.4 ha), mientras que el de regresión lineal, la mayor (60 754.3 ha). Dichas superficies se localizan en áreas urbanas, campos agrícolas y pastizales en las zonas planas al centro y norte del área de estudio, donde hay una fuerte presión por crecimiento poblacional y urbano, debido a que las características como la pendiente hacen que sean idóneas para el establecimiento de infraestructura y sujetas a cambios de uso de suelo.

Debido a la relación de las variables climáticas con la distribución del tecolote llanero, el cambio climático podría representar otra amenaza para la especie. Las predicciones de diversos modelos del cambio climático sugieren un aumento en la temperatura anual y una disminución en las precipitaciones anuales, aunque también un aumento en la lámina de

precipitación (Trejo *et al.*, 2007; Villers-Ruiz y Trejo-Vázquez, 2003). Por ende, se prevé cambio de patrones espaciales y temporales en las áreas agrícolas, así como probables sequías en los pastizales (Trejo *et al.*, 2007), que afectarían la disponibilidad de alimentos para la especie. Además, los patrones de precipitación se han vuelto más erráticos, presentándose con mayor frecuencia eventos extremos (Santiago-Lastra *et al.*, 2008), los cuales reducen el tiempo dedicado a conseguir alimentos, y generan una mayor probabilidad de inundaciones en las madrigueras, lo que disminuye la aptitud de la especie (Fisher *et al.*, 2015).

Las variables que influyeron en la distribución de la especie no pueden ser modificadas directamente mediante acciones de conservación. Sin embargo, dichas variables señalaron indirectamente otros aspectos que si pueden ser sujeto de acciones de conservación: 1) mediante un manejo adecuado de los patrones de agricultura se podría favorecer la disponibilidad de presas (Botelho y Arrowood, 1996; Gervais *et al.*, 2003), y disminuir el riesgo de pesticidas para el tecolote (Gervais *et al.*, 2000); 2) es necesario limitar la expansión urbana, a pesar del aumento en la disponibilidad de recursos, la supervivencia de tecolotes se ve afectada por el aumento de infraestructura (Millsap, 2002; Millsap y Bear, 2000).

Evaluación de los modelos

Las particiones aleatorias de los datos fueron en proporción de 70 % para los de entrenamiento y el 30 % para los de prueba. Las particiones se generaron 10 veces para las pruebas. En el Cuadro 1.10 se muestran los resultados de cuatro indicadores de desempeño de los modelos generados.

De acuerdo con el valor del AUC, los tres modelos tuvieron un desempeño aceptable; valores mayores de 0.5 indican que los modelos discriminan entre las presencias y ausencias

mejor que una clasificación aleatoria (Fielding y Bell, 1997; Yost *et al.*, 2008). El índice Kappa presentó valores entre 0.4 y 0.75 lo que indica un buen desempeño de los modelos (Fielding y Bell, 1997). A pesar de que el algoritmo de máxima entropía es de mayor utilidad cuando se cuenta únicamente con datos de presencia, los estadísticos de evaluación empleados (AUC, índice Kappa y suma de cuadrados residual) lo señalaron como el de mejor desempeño entre los modelos empleados.

Cuadro 1.10. Evaluación de los modelos empleados para la distribución potencial de tecolote llanero en el nororiente del Valle de México en 2016.

	Regresión Logística [†]			Regresión Lineal [‡]			Máxima entropía [§]		
	Media	LC al 95 %		Media	LC al 95 %		Media	LC al 95 %	
Área bajo la Curva	0.81	0.78	0.84	0.79	0.76	0.82	0.87	0.86	0.88
Índice Kappa	0.46	0.35	0.57	0.48	0.39	0.56	0.50	0.41	0.59
Suma de cuadrados residual	5.70	5.25	6.15	5.93	5.63	6.22	5.15	4.81	5.49

[†]Modelo de regresión logística: Pend+Tmax+pTgru+Pp3cal; [‡]modelo de regresión lineal: Pend+pTgru+Tanual+Tmax+Pp3cal; [§]modelo de máxima entropía: Pend+Elev+Pp3cal+pTgru+Tanual+Tmax.

De acuerdo con otras investigaciones, el número de registros usados (n=41) para la ejecución de los modelos es suficiente para producir resultados aceptables: Stockwell y Peterson (2002) evaluaron la precisión de un modelo de regresión logística con respecto al número de registros usados, encontraron que la precisión de los modelos ejecutados con 40-50 registros pasa del 90% de la máxima precisión, la cual la alcanza con 100 ocurrencias. Concluyeron que el modelo de regresión logística empleado necesita de un grupo de registros pequeño. Sin embargo Jiménez-Valverde *et al.* (2009) encontraron que modelos elaborados

con 20 registros pueden ser moderadamente confiables, pero a partir de las 70 ocurrencias la confiabilidad alcanzada se vuelve independiente del número de registros. Para el modelo de máxima entropía en MaxEnt® Hernandez *et al.* (2006), Van Proosdij *et al.* (2016) y Wisz *et al.* (2008) encontraron que a partir de los 25 -30 registros el modelo tiene un desempeño aceptable.

CONCLUSIONES

Este trabajo permitió determinar las zonas con una mayor probabilidad de presencia del tecolote llanero, así como las variables ambientales que están relacionadas con la presencia de la especie, esto ayudaría a realizar acciones de conservación.

Las variables ambientales que explican la presencia del tecolote llanero en el área de estudio son la precipitación del trimestre más cálido, temperatura máxima, proporción de suelos con textura gruesa, pendiente, estacionalidad de la temperatura y temperatura anual. De acuerdo con los tres modelos empleados, las variables climáticas son las más importantes para predecir la distribución de la especie en el área de estudio, por encima de la textura del suelo y de variables relacionadas con el uso de suelo e infraestructura humana. Los tres modelos concuerdan en señalar a la precipitación del trimestre más cálido como la variable de mayor importancia. Esto puede deberse a la relación entre el aumento de la disponibilidad de presas, la temporada de reproducción y de lluvias.

El modelo de regresión lineal, regresión logística y el de máxima entropía coinciden en señalar, de manera general, las mismas zonas para la distribución potencial de tecolote, pero el de máxima entropía predice una menor superficie.

Con el conjunto de datos de presencia/ausencia empleado los modelos producen información confiable. El modelo de máxima entropía obtuvo el mejor desempeño de acuerdo con los estadísticos de evaluación.

LITERATURA CITADA

Botelho, E. S., and P. C. Arrowood. 1996. Nesting success of western burrowing owls in natural and human-altered environments. *In* Raptors in human landscapes: adaptations to built and cultivated environments. Bird, D. M., A. E. Varland, and J. J. Negro. Academic Press. 61–68.

Burnham, K. P., and D. R. Anderson. 2002. Model selection and multimodel inference: a practical information-theoretic approach. Second Edition. Springer. New York. 488 p.

Butts, K. O., and J. C. Lewis. 1982. The importance of prairie dog towns to burrowing owls in Oklahoma. *Proc. Okla. Acad. Sc.* 62: 46–52.

Commission for Environmental Cooperation. North American Conservation Action Plan (*Athene cucularia hypugaea*). 2005. Commission for Environmental Cooperation. Canada. 55 p.

Conway, C. J., V. Garcia, M. D. Smith, L. A. Ellis, and J. L. Whitney. 2006. Comparative demography of burrowing owls in agricultural and urban landscapes in southeastern Washington. *J. Field Ornithol.* 77: 280–290.

Coulombe, H. N. 1971. Behavior and population ecology of the burrowing owl, *Speotyto cucularia*, in the Imperial Valley of California. *The Condor.* 73: 162–176.

Crowe, D. E., and K. M. Longshore. 2013. Nest site characteristics and nesting success of the Western Burrowing Owl in the eastern Mojave Desert. *J. Arid Environ.* 94: 113–120.

Cruz-Carretero, O., and K. McDonnell. 2005. Collaborative efforts to determine wintering grounds and habitat quality for burrowing owls (*Athene cucularia*) in México. *Envirological Services.* Albuquerque, NM. 31 p.

Elith, J., and J. R. Leathwick. 2009. Species distribution models: ecological explanation and prediction across space and time. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 40: 677–697.

Fernández, E. A., C. R. Romero y H. J. Zavala. 2012. Atlas Climático Digital de México. Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México. Extraído de: <http://uniatmos.atmosfera.unam.mx>.

Fielding, A. H., and J. F. Bell. 1997. A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models. *Environ. Conserv.* 24: 38–49.

FIRCO - UAQ. 2005. Delimitación Nacional de Microcuencas, escala 1:20,000.

Fisher, R. J., R. G. Poulin, L. D. Todd, and R. M. Brigham. 2004. Nest stage, wind speed, and air temperature affect the nest defence behaviours of burrowing owls. *Can. J. Zool.* 82: 707–713.

Fisher, R. J., T. I. Wellicome, E. M. Bayne, R. G. Poulin, L. D. Todd, and A. T. Ford. 2015. Extreme precipitation reduces reproductive output of an endangered raptor. *J. Appl. Ecol.* 52: 1500–1508.

Franklin, J. 2009. Mapping species distributions. Spatial inference and prediction. Cambridge University Press. Cambridge, UK. 320 p.

Gervais, J. A., D. K. Rosenberg, and R. G. Anthony. 2003. Space use and pesticide exposure risk of male burrowing owls in an agricultural landscape. *J. Wildl. Manage.* 67: 155–164.

Gervais, J. A., D. K. Rosenberg, D. M. Fry, L. Trulio, and K. K. Sturm. 2000. Burrowing owls and agricultural pesticides: evaluation of residues and risks for three populations in California, USA. *Environ. Toxicol. Chem.* 19: 337–343.

Gómez de Silva, H. 2006. Área donde coinciden las predicciones GARP de la distribución en México de *Athene cunicularia* hecha con y sin los datos de presencia en localidades climáticamente extremas, escala 1:1000000, México. CONABIO.

Green, G. A., and R. G. Anthony. 1989. Nesting success and habitat relationships of burrowing owls in the Columbia Basin, Oregon. *The Condor*. 91: 347–354.

Guillera-Aroita, G., J. J. Lahoz-Monfort, and J. Elith. 2014. Maxent is not a presence-absence method: a comment on Thibaud et al. *Methods Ecol. Evol.* 5: 1192–1197

Guisan, A., and U. Hofer. 2003. Predicting reptile distributions at the mesoscale: relation to climate and topography. *J. Biogeogr.* 30: 1233–1243.

Guisan, A., and N. E. Zimmerman. 2000. Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecol. Model.* 135: 147–186.

Haley, K. L., and D. K. Rosenberg. 2013. Influence of food limitation on reproductive performance of burrowing owls. *J. Raptor Res.* 47: 365–376.

Haug, E. A., and L. W. Oliphant. 1990. Movements, activity patterns, and habitat use of burrowing owls in Saskatchewan. *J. Wildl. Manage.* 54: 27–35.

Hernandez, P. A., C. H. Graham, L. L. Master, and D. L. Albert. 2006. The effect of sample size and species characteristics on performance of different species distribution modeling methods. *Ecography*. 29: 773–785.

Holroyd, G. L., C. J. Conway, and H. E. Trefry. 2011. Breeding dispersal of a burrowing owl from Arizona to Saskatchewan. *Wilson J. Ornithol.* 123: 378–381.

Holroyd, G. L., R. Rodríguez-Estrella, and S. R. Sheffield. 2001. Conservation of the burrowing owl in western North America: issues, challenges, and recommendations. *J. Raptor Res.* 35: 399–407.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 1977. Cartas edafológicas escala 1:50000.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 1982. Cartas edafológicas escala 1:50000.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2010. Red hidrográfica escala 1:5000, edición 2.0.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2011. Conjunto de datos vectoriales de carreteras y vialidades, edición 1.0.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2013a. Conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación, escala 1:250 000, serie V.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2013b. continuo de elevaciones mexicano.

Jiménez-Valverde, A., J. Lobo, and J. Hortal. 2009. The effect of prevalence and its interaction with sample size on the reliability of species distribution models. *Community Ecol.* 10: 196–205.

López-Vázquez, V. H y W. Plata Rocha. 2009. Análisis de los cambios de cobertura de suelo derivados de la expansión urbana de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, 1990-2000. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía.* 68: 85-101.

Keating, K. A., and S. Cherry. 2004. Use and interpretation of logistic regression in habitat-selection studies. *J. Wildl. Manage.* 68: 774–789.

Klute, D. S., L. W. Ayers, M. T. Green, W. H. Howe, S. L. Jones, J. A. Shaffer, S. R. Sheffield, and T. S. Zimmerman. 2003. Status assessment and conservation plan for the

western burrowing owl in the United States. U.S. Department of Interior, Fish and Wildlife Service, Biological Technical Publication FWS/BTO-R6001-2003, Washington, D.C. pp 108.

Lantz, S. J., C. J. Conway, and S. H. Anderson. 2007. Multiscale habitat selection by burrowing owls in black-tailed prairie dog colonies. *J. Wildl. Manage.* 71: 2664–2672.

Larson, K. B. 2009. Nest habitat selection of burrowing owls in relation to soils, burrow availability, and burrow temperature. Washington State University.

MacCracken, J. G., D. W. Uresk, and R. M. Hansen. 1985. Vegetation and soils of burrowing owl nest sites in Conata Basin, South Dakota. *The Condor.* 87: 152–154.

Machicote, M., L. C. Branch, and D. Villarreal. 2004. Burrowing owls and burrowing mammals: are ecosystem engineers interchangeable as facilitators? *Oikos.* 106: 527–535.

Macías-Duarte, A. 2011. Change in migratory behavior as a possible explanation for burrowing owl population declines in northern latitudes. The University of Arizona.

Macías-Duarte, A., and C. J. Conway. 2015. Spatial patterns in hydrogen isotope ratios in feathers of burrowing owls from western North America. *The Auk.* 132: 25–36.

Maderey, R. L. E. 1980. Intensidad de la precipitación en el Valle de México. *Boletín Instituto de Geografía.* 10: 7–54.

McDonnell, K., and O. Cruz-Carretero. 2006. Use of radio-telemetry to determine wintering grounds of Burrowing Owls (*Athene cunicularia*). Albuquerque, NM.

McFarland, K. P., C. C. Rimmer, J. E. Goetz, Y. Aubry, J. M. Wunderle, A. Sutton, J. M. Townsend, A. Llanes-Sosa, and A. Kirkconnell. 2013. A winter distribution model for Bicknell's thrush (*Catharus bicknelli*), a conservation tool for a threatened migratory songbird. *PLoS ONE.* 8: 1-9.

Millsap, B. A. 2002. Survival of florida burrowing owls along an urban-development gradient. *J. Raptor Res.* 36: 3–10.

Millsap, B. A., and C. Bear. 2000. Density and reproduction of burrowing owls along an urban development gradient. *J. Wildl. Manage.* 64: 33–41.

NaturaLista, 2016. *Athene cunicularia hypugaea*, NaturaLista-CONABIO. www.naturalista.mx. Consultado el 30 de marzo de 2016.

Perevochtchikova, M. 2009. La situación actual del sistema de monitoreo ambiental en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. *Estudios Demográficos y Urbanos.* 24: 513–547.

Phillips, S. J., R. P. Anderson, and R. E. Schapire. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecol. Model.* 190: 231–259.

Plumpton, D. L., and R. S. Lutz. 1993. Nesting habitat use by burrowing owls in Colorado. *J. Raptor Res.* 27: 175–179.

Poulin, R. G., L. D. Todd, E. A. Haug, B. A. Millsap, and M. S. Martell. 2011. Burrowing Owl (*Athene cunicularia*). *The Birds of North America Online.* 61.

Rich, T. 1986. Habitat and nest-site selection by burrowing owls in the sagebrush steppe of Idaho. *J. Wildl. Manage.* 50: 548–555.

Rodríguez-Estrella, R., and A. Ortega-Rubio. 1993. Nest site characteristics and reproductive success of burrowing owls (*Strigiformes, Strigidae*) in Durango, Mexico. *Revista de Biología Tropical.* 41: 143–148.

Rosenberg, D. K., and K. L. Haley. 2004. The ecology of burrowing owls in the agroecosystem of the Imperial Valley California. *Studies in Avian Biology.* 27: 120–135.

Santiago-Lastra, J. A., M. López-Carmona, y S. López-Mendoza. 2008. Tendencias del cambio climático global y los eventos extremos asociados. *Ra Ximhai:* 4: 625–633.

- SAS Institute Inc. 2016. SAS University Edition virtual application. Cary, NC, USA.
- Silva-Porto, F., and R. Cerqueira. 1990. Seasonal variation in the diet of the burrowing owl *Athene cunicularia* in a restinga in Rio de Janeiro State. *Ciência E Cultura*. 42: 1182–1188.
- Stevens, A. F. J., E. M. Bayne, and T. I. Wellicome. 2011. Soil and climate are better than biotic land cover for predicting home-range habitat selection by endangered burrowing owls across the Canadian Prairies. *Biol. Conserv.* 144: 1526–1536.
- Stockwell, D. R. B., and A. T. Peterson. 2002. Effects of sample size on accuracy of species distribution models. *Ecol. Model.* 148: 1–13.
- Thiele, J. P., K. K. Bakker, and C. D. Dieter. 2013. Multiscale nest site selection by burrowing owls in western South Dakota. *Wilson J. Ornithol.* 125: 763–774.
- Townsend Peterson, A., and A. G. Navarro-Sigüenza. 2006. Hundred-year changes in the avifauna of the Valley of Mexico, Distrito Federal, Mexico. *Huitzil. Revista Mexicana de Ornitología*. 7: 4–14.
- Trejo, I., Hernández, J., y L. Villers. 2007. Afectación de las comunidades vegetales de México ante el cambio climático. *In: XI Encuentro de Geógrafos de América Latina. Geopolítica, Globalización Y Cambio Ambiental: Retos Para El Desarrollo Latinoamericano*, 15.
- Van Proosdij, A. S. J., M. S. M. Sosef, J. J. Wieringa, and N. Raes. 2016. Minimum required number of specimen records to develop accurate species distribution models. *Ecography*. 39: 542–552.
- Villers-Ruiz, L., y Trejo-Vázquez, I. (2000). El cambio climático y la vegetación en México. *México: Una Visión Hacia El Siglo XXI. El Cambio Climático En México.*, 57–72.

Wellicome, T. I., L. D. Todd, R. G. Poulin, G. L. Holroyd, and R. J. Fisher. 2013. Comparing food limitation among three stages of nesting: supplementation experiments with the burrowing owl. *Ecol. Evol.* 3: 2684–2695.

Wisz, M. S., R. J. Hijmans, J. Li, A. T. Peterson, C. H. Graham, A. Guisan, J. Elith, M. Dudík, S. Ferrier, F. Huettmann, J. R. Leathwick, A. Lehmann, L. Lohmann, B. A. Loiselle, G. Manion, C. Moritz, M. Nakamura, Y. Nakazawa, J. Mc C. Overton, S. J. Phillips, K. S. Richardson, R. Scachetti-Pereira, R. E. Schapire, J. Soberón, S. E. Williams, and N. E. Zimmermann. 2008. Effects of sample size on the performance of species distribution models. *Divers. Distrib.* 14: 763–773.

Yost, A. C., S. L. Petersen, M. Gregg, and R. Miller. 2008. Predictive modeling and mapping sage grouse (*Centrocercus urophasianus*) nesting habitat using Maximum Entropy and a long-term dataset from Southern Oregon. *Ecol. Inform.* 3: 375–386.

CAPÍTULO 2 . ABUNDANCIA DE TECOLOTE LLANERO OCCIDENTAL EN EL NORORIENTE DEL VALLE DE MÉXICO

RESUMEN

El tecolote llanero (*Athene cunicularia hypugaea*) es una especie de amplia distribución en Norteamérica, que ha mostrado una declinación en sus poblaciones. En México, hay poca información que permita observar los cambios espacio-temporales de su abundancia. El objetivo de este estudio fue obtener información sobre la abundancia poblacional en el nororiente del Valle de México. De enero a julio del 2016 se realizaron transectos de 1 km de longitud por 200 m de ancho y se buscaron nidos de la especie en el nororiente del Valle de México. Se estimaron 0.5 individuos km^{-1} y 1.0 nidos km^{-2} . Estas estimaciones permiten observar que la densidad es mayor a la reportada en Canadá, pero se encuentra cerca del límite inferior del rango de las estimadas en los Estados Unidos y el norte de México. Sin embargo, las estimaciones obtenidas presentan una baja precisión debida a que el conjunto de datos usados fue pequeño. A pesar de no ser estimaciones confiables sobre la abundancia del tecolote en el área de estudio, los resultados muestran una aproximación del estado de la población en el nororiente del Valle de México.

Palabras clave: índice de abundancia, población

INTRODUCCIÓN

El estudio de los cambios en el tamaño de las poblaciones puede tener diferentes propósitos: uno de ellos es el de evaluar el estatus de una especie que se encuentre en peligro de extinción o amenazada, o bien, observar las respuestas de las poblaciones de una especie a determinadas acciones de manejo, entre otras (Marsh y Trenham, 2008; Witmer, 2005).

Para entender la estructura y la dinámica de las poblaciones, como el crecimiento o la disminución del tamaño poblacional, es necesario contar con información sobre los procesos o parámetros primarios de las poblaciones, tales como la natalidad, mortalidad, fecundidad, emigración e inmigración; sin embargo, cuando los recursos no son suficientes para estudiar dichos procesos, el tamaño de la población expresado mediante la densidad o abundancia suele ser útil ya que permite contar con información general acerca del estado que guardan las poblaciones bajo estudio (Witmer, 2005).

El tecolote llanero occidental (*Athene cunicularia hypugaea*) es un ave que se encuentra amenazada por diferentes factores (Poulin *et al.*, 2011); sus poblaciones están declinando en varias regiones, a pesar de que tiene una amplia distribución (Poulin *et al.*, 2011), y que se ha adaptado a áreas bajo impacto humano (Gervais *et al.*, 2008).

Los estudios realizados sobre la abundancia del tecolote llanero muestran resultados muy variables en toda su distribución. Por ejemplo, en Canadá, Estados Unidos y el norte de México se han estimado densidades locales entre 0.02 y 158 nidos km⁻² (Berardelli *et al.*, 2010; Conway *et al.*, 2006; Conway y Simon, 2003; COSEWIC, 2006; Crowe y Longshore, 2010; Macias-Duarte, 2011; Murphy *et al.*, 2001; Rodríguez-Estrella y Ortega-Rubio, 1993; Shyry *et al.*, 2001). Para el centro de México (Estado de México, México e Hidalgo), en cambio, la información sobre el estado de las poblaciones es nula.

En la región central de México se distribuye una población residente de tecolote llanero que parece estar aislada genéticamente de las del norte de México (Macias-Duarte, 2011), además, el área está bajo una fuerte presión por el crecimiento poblacional humano y los cambios de uso de suelo.

Por consiguiente, el presente estudio busca estimar la abundancia poblacional del tecolote llanero en la región central de México, y debido a que se desconoce la extensión geográfica de las poblaciones en dicha zona, el estudio se enfocó en el nororiente del Valle de México, donde se localizan los registros históricos de la especie (Townsend Peterson y Navarro-Sigüenza, 2006).

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El área de estudio se localiza en la región oriental del Estado de México, también incluye una pequeña fracción de los estados de Hidalgo, Tlaxcala y la Ciudad de México (Figura 2.1). Tiene una superficie de 339 586 ha y abarca 63 municipios, de los cuales 44 tienen más de la mitad de su superficie dentro del área de estudio. El área incluye 19 microcuencas de la subcuenca hidrológica Pachuca - Ciudad de México (FIRCO - UAQ, 2005) que conforman una zona compacta donde se tienen registros históricos y actuales del tecolote llanero en el Valle de México.

La zona de estudio es un área que ha tenido un fuerte crecimiento poblacional y desarrollo urbano desde la década de 1950 (Unikel, 1974); existe un flujo migratorio humano de las zonas rurales hacia la zona metropolitana en busca de mejores empleos y oportunidades, lo que ha generado la expansión de la mancha urbana y modificado el paisaje del área

(Perevochtchikova, 2009). Por ejemplo, las zonas urbanas de la zona metropolitana de la Ciudad de México se han expandido un 15 % en sobre las áreas de cultivo, pastizales halófilos, vegetación arbustiva y bosques durante la década de 1990 a 2000 (López Vázquez y Plata Rocha, 2009). De acuerdo con INEGI (2013) las áreas agrícolas (de riego y temporal) cubren casi la mitad de la superficie de la zona de estudio (45 %), seguido de las áreas urbanas (30 %), bosques (10 %) y pastizales (9 %), áreas sin vegetación aparente y matorral (2 % cada una) y cuerpos de agua, tular y vegetación halófila (2 %).

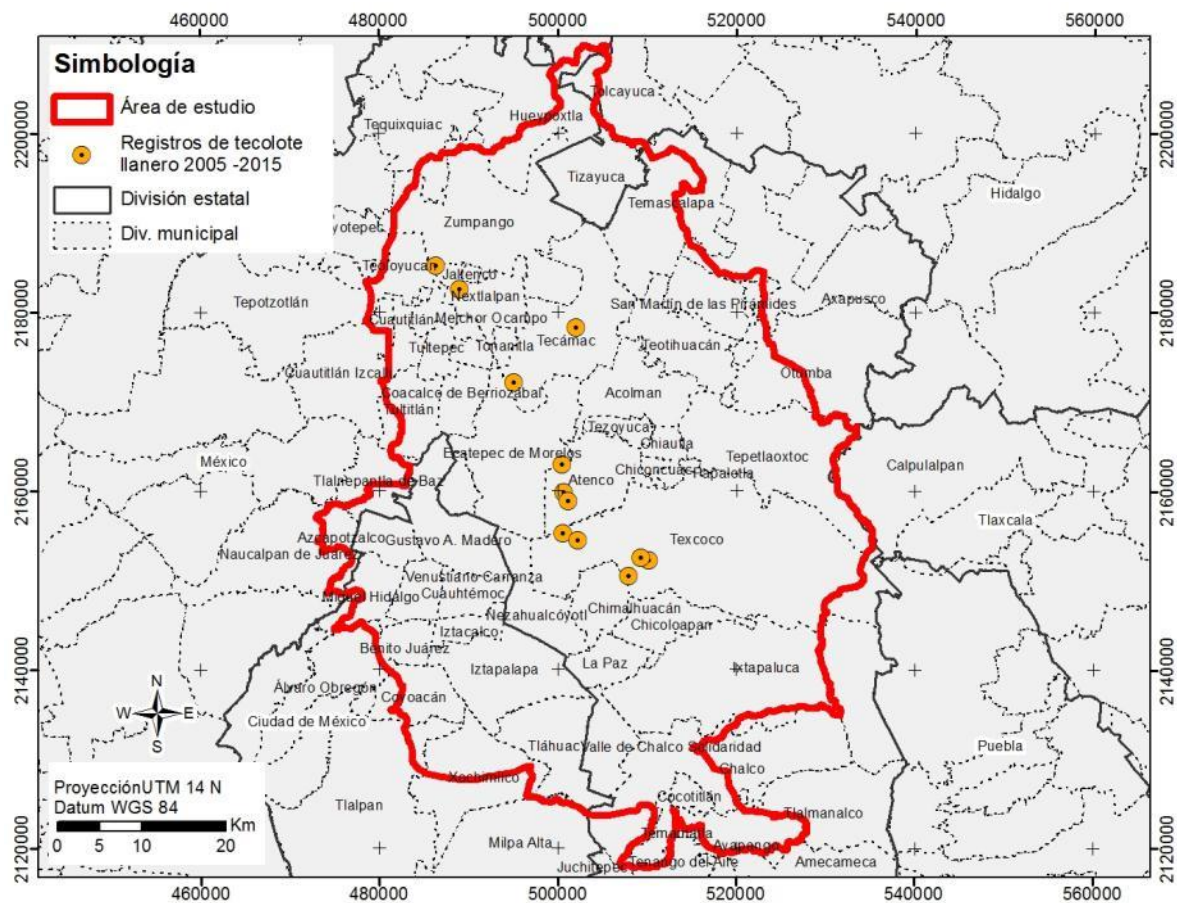


Figura 2.1. División municipal del oriente del Estado de México y demarcación del área de estudio de tecolote llanero (*A. cunicularia*), año 2016.

Abundancia de tecolote llanero

Se estableció una retícula de cuadros de 1 km por lado al área de estudio, de la cual se excluyeron aquellas áreas completamente urbanas, zonas boscosas y el área en construcción del Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México. Se seleccionaron aleatoriamente 52 cuadros y 29 cuadros orientados hacia las zonas que no tuvieran registros de tecolote llanero (Figura 2.2; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Además, se ubicaron transectos en las zonas donde se había reportado previamente la observación de búhos y en zonas que por el uso de suelo y pendiente del terreno, constituían hábitat potencial de tecolote llanero. En cada cuadro se implementó un transecto de 1 km de longitud por 200 m de ancho; los transectos se ubicaron sobre caminos que atravesaban completamente el cuadro, de enero a julio del 2016. Los transectos se recorrieron caminando a una velocidad promedio de 3 km h^{-1} , desde las 07:30 h y hasta las 11:30 h (aproximadamente 4 horas después del amanecer) y 3 horas antes del atardecer, es decir, aproximadamente de las 17:00 h a las 20:00 h. Debido a la inseguridad pública, en algunas zonas no se recorrieron los transectos después de las 19:00 h.

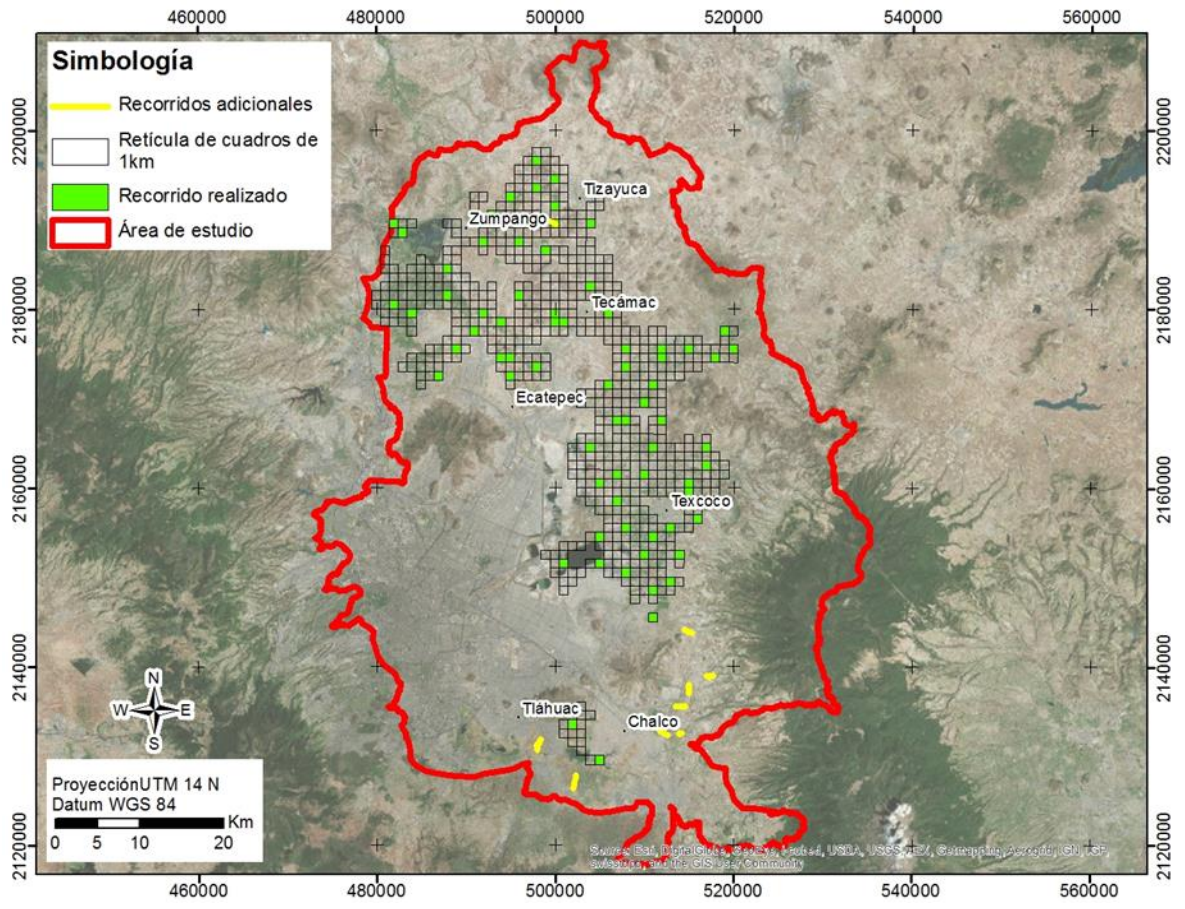


Figura 2.2. Reticula de cuadros de 1 km sobre el área de estudio y transectos recorridos para estimar la abundancia de tecolote llanero en 2016.

Se registraron los individuos de tecolote llanero observados dentro de cada transecto recorrido. Al finalizar el recorrido de los transectos se buscaron y localizaron las madrigueras de los tecolotes observados, y se corroboró que estas estuvieran activas, mediante la presencia de egagrópilas, plumas o excremento fresco (Crowe y Longshore, 2013); además, se registraron sus coordenadas geográficas con un GPS Garmin Etrex ® 30. Con el número de individuos, madrigueras registradas y la superficie abarcada por los transectos, se construyó un índice de abundancia (número de individuos km^{-1} recorrido) y una estimación de la densidad (número de nidos km^{-2}). Se obtuvo el promedio y los intervalos de confianza al 95% de los valores anteriores con el método de *bootstrapping*.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se observó la presencia de 44 tecolotes y 35 nidos en únicamente 18 de los 89 transectos recorridos en el área de estudio, y se registraron de uno a cinco nidos en dichos transectos. El índice de abundancia relativa muestra que en promedio se encontraron 0.5 ind km^{-1} (IC 95 %: 0.2- 0.7), mientras que la estimación de densidad de nidos fue de 1 nido km^{-2} (IC 95 %: 0.5- 1.5).

La amplitud en los límites de confianza al 95 % señala que los índices estimados son poco confiables debido a que el tamaño de muestra usado ($n=89$) es pequeño. El índice de abundancia relativa obtenido se encuentra dentro del rango de estudios realizados en Estados Unidos, que van de 0.016 a 0.98 individuos km^{-1} (Conway y Simon, 2003; Winter y Cully, 2007). En cambio, la densidad de nidos fue mayor a la que, por ejemplo, ocurre en Canadá, donde en cuatro estudios se estimaron entre 0.02 y 0.9 nidos km^{-2} en áreas de pastizales (COSEWIC, 2006; Shyry *et al.*, 2001); sin embargo, es la región donde las poblaciones han disminuido drásticamente en los últimos años (COSEWIC, 2006; Shyry *et al.*, 2001; Skeel *et al.*, 2001). En los Estados Unidos, de acuerdo a cinco estudios, la densidad de nidos varió desde 0.03 hasta 158 nidos km^{-2} de acuerdo a si la localidad se ubicaba en ecosistemas de pastizales, áreas agrícolas o urbanas (Berardelli *et al.*, 2010; Conway *et al.*, 2006; Conway y Simon, 2003; Crowe y Longshore, 2010; Murphy *et al.*, 2001).

Para México, la densidad de nidos reportada presenta la misma variabilidad, de 0.2 a 4.7 nidos km^{-2} en áreas agrícolas y pastizal (Macias-Duarte, 2011; Rodríguez-Estrella y Ortega-Rubio, 1993). Por otra parte, otros tres estudios reportan densidad poblacional de 0.33 a 14.1

individuos km⁻² en el norte del país (Iturribarria-Rojas, 2002; Ruiz-Ayma *et al.*, 2016; Valencia-Maldonado *et al.*, 2016).

Sin embargo, la alta variabilidad en las densidades de nidos de tecolote llanero reportada en otras regiones de México, Estados Unidos y Canadá con respecto al presente estudio se puede explicar principalmente por el tamaño de muestra usado en este estudio, y por los siguientes factores que influyen sobre las estimaciones de densidad:

1) se trata de estudios realizados en diferentes tipos de hábitat, que van desde áreas agrícolas, pastizales naturales y áreas urbanas, donde los recursos disponibles son diferentes (Crowe y Longshore, 2010). Por ejemplo, en áreas agrícolas de riego se ha relacionado una mayor productividad en la especie con una mayor disponibilidad de alimentos y madrigueras (Gervais *et al.*, 2003; Macias-Duarte, 2011). En el hábitat natural, las colonias de perritos de la pradera ofrecen un mayor número de madrigueras disponibles para refugio y anidamiento del tecolote llanero (Butts y Lewis, 1982; Lantz, 2005), ya que se relacionan más con el éxito reproductivo de la especie (Restani *et al.*, 2008). Las áreas urbanas también se relacionan con un aumento en la productividad de la especie debido al aumento en la disponibilidad de presas (Millsap y Bear, 2000).

2) Los estudios comparados emplearon diferentes métodos de muestreo: puntos de observación de diferente radio (Conway *et al.*, 2006; Conway y Simon, 2003; Murphy *et al.*, 2001; Shyry *et al.*, 2001); transectos de diferente longitud y amplitud, recorridos a pie (Crowe y Longshore, 2010; Ruiz-Ayma *et al.*, 2016) o en vehículo (Conway y Simon, 2003), y búsqueda intensiva en unidades de muestreo, como parcelas circulares y cuadradas (Berardelli *et al.*, 2010; Valencia-Maldonado *et al.*, 2016). Además, hay que considerar el tamaño del área muestreada y la habilidad del observador, entre otros factores (Ruiz-Ayma *et al.*, 2016).

Otro aspecto que influye es la urbanización y perturbación que ha sufrido el paisaje en el Valle de México durante las últimas décadas. Las áreas urbanas en esta zona cubren una mayor superficie en comparación con las del norte del país. Por ejemplo, las zonas urbanas en el área del presente estudio cubren el 30 % de la superficie, mientras que en las regiones de estudio de Macias-Duarte (2011) en Sonora y Sinaloa y de Iturribarria-Rojas (2002) en Baja California cubren menos del 2 % (INEGI, 2013). Al contrario, donde se presentaron las menores densidades de tecolote llanero (Rodríguez-Estrella y Ortega-Rubio, 1993) la superficie de área urbana es de alrededor del 0 % (INEGI, 2013). Por lo tanto, las densidades poblacionales de tecolote llanero occidental no pueden ser explicadas únicamente por este factor, sin embargo, vale la pena mencionarlo.

CONCLUSIONES

Los resultados del presente trabajo aportan información sobre el tamaño de las poblaciones de tecolote llanero en el centro de México, particularmente en el Valle de México. Sin embargo, la abundancia estimada presenta una baja precisión debida a que el conjunto de datos usados es pequeño.

De acuerdo con el índice de abundancia relativa se estimaron 0.5 individuos km^{-1} y una densidad de 1 nido km^{-2} . Estos resultados muestran que la abundancia de la población en el Valle de México es mayor a la que ocurre al sur de la provincia de Alberta, Canadá, y se encuentra cerca del límite inferior del rango de las densidades estimadas en algunas localidades del este de los Estados Unidos y el norte de México.

A pesar de no ser estimaciones confiables sobre la abundancia del tecolote en el área de estudio, los resultados muestran una aproximación del estado de la población en el nororiente del Valle de México.

LITERATURA CITADA

Berardelli, D., M. J. Desmond, and L. Murray. 2010. Reproductive success of burrowing owls in urban and grassland habitats in southern New Mexico. *Wilson J. Ornithol.* 122: 51–59.

Butts, K. O., and J. C. Lewis. 1982. The importance of prairie dog towns to burrowing owls in Oklahoma. *Proc. Okla. Acad Sc.* 62: 46–52.

Conway, C. J., V. Garcia, M. D. Smith, L. A. Ellis, and J. L. Whitney. 2006. Comparative demography of burrowing owls in agricultural and urban landscapes in southeastern Washington. *J. Field Ornithol.* 77: 280–290.

Conway, C. J., and J. C. Simon. 2003. Comparison of detection probability associated with burrowing owl survey methods. *J. Wildl. Manage.* 67: 501–511.

COSEWIC (Committee on the status of endangered wildlife in Canada). 2006. Assessment and update status report on the burrowing owl *Athene cunicularia* in Canada. Committee on the status of endangered wildlife in Canada. 31 p.

Crowe, D. E., and K. M. Longshore. 2010. Estimates of density, detection probability, and factors influencing detection of burrowing owls in the Mojave Desert. *J. Raptor Res.* 44: 1–11.

Crowe, D. E., and K. M. Longshore. 2013. Nest site characteristics and nesting success of the Western Burrowing Owl in the eastern Mojave Desert. *J. Arid Environ.* 94: 113–120.

Cruz-Carretero, O., and K. McDonnell. 2005. Collaborative efforts to determine wintering grounds and habitat quality for burrowing owls (*Athene cunicularia*) in México. *Envirological Services*. Albuquerque, NM. 31 p.

FIRCO - UAQ. 2005. Delimitación Nacional de Microcuencas, escala 1:20,000.

Gervais, J. A., D. K. Rosenberg, and R. G. Anthony. 2003. Space use and pesticide exposure risk of male burrowing owls in an agricultural landscape. *J. Wildl. Manage.* 67: 155–164.

Gervais, J. A., D. K. Rosenberg, and L. A. Comrack. 2008. Burrowing owl (*Athene cunicularia*). *In: California Bird Species of Special Concern, Studies of Western Birds No. 1.* Shuford W. D. and T. Gardali (Eds). Pp: 218–226.

Gómez de Silva, H. 2006. Área donde coinciden las predicciones GARP de la distribución en México de *Athene cunicularia* hecha con y sin los datos de presencia en localidades climáticamente extremas, escala 1:1000000, México. CONABIO.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2013. Conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación, escala 1:250 000, serie V.

Iturribarria-Rojas, H. 2002. Estimación de abundancia y afinidad de habitat del Tecolote Llanero (*Athene cunicularia hypugea*) en el Valle de Mexicali, Baja California y Sonora, México. Universidad Autónoma de Guadalajara, Guadalajara, México.

Lantz, S. J. 2005. Nesting ecology and habitat selection of western burrowing owls (*Athene cunicularia hypugaea*) in the thunder basin national grassland, northeastern Wyoming. University of Wyoming.

López-Vázquez, V. H y W. Plata Rocha. 2009. Análisis de los cambios de cobertura de suelo derivados de la expansión urbana de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, 1990-2000. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía.* 68: 85-101.

Macias-Duarte, A. 2011. Change in migratory behavior as a possible explanation for burrowing owl population declines in northern latitudes. The University of Arizona.

Marsh, D. M., and P. C. Trenham. 2008. Current trends in plant and animal population monitoring. *Conserv. Biol.* 22: 647–655.

Millsap, B. A., and C. Bear. 2000. Density and reproduction of burrowing owls along an urban development gradient. *J. Wildl. Manage.* 64: 33–41.

Murphy, R. K., K. W. Hasselblad, C. D. Grondahl, J. G. Sidle, R. E. Martin, and D. W. Freed. 2001. Status of the burrowing owl in North Dakota. *J. Raptor Res.* 35: 322–330.

NaturaLista, 2016. *Athene cunicularia hypugaea*, NaturaLista-CONABIO. www.naturalista.mx. Consultado el 30 de marzo de 2016.

Perevochtchikova, M. 2009. La situación actual del sistema de monitoreo ambiental en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. *Estudios Demográficos y Urbanos.* 24: 513–547.

Poulin, R. G., L. D. Todd, E. A. Haug, B. A. Millsap, and M. S. Martell. 2011. Burrowing Owl (*Athene cunicularia*). *The Birds of North America Online.* 61.

Restani, M., Davies, J. M., y Newton, W. E. (2008). Importance of agricultural landscapes to nesting burrowing owls in the Northern Great Plains, USA. *Landsc. Ecol.* 23: 977–987.

Rodríguez-Estrella, R., and A. Ortega-Rubio. 1993. Nest site characteristics and reproductive success of burrowing owls (*Strigiformes, Strigidae*) in Durango, Mexico. *Revista de Biología Tropical.* 41: 143–148.

Ruiz-Ayma, G., A. Olalla-Kerstupp, A. Macías-Duarte, A. Guzmán-Velasco, and J. I. González-Rojas. 2016. Population density of the western burrowing owl (*Athene cunicularia hypugaea*) in mexican prairie dog (*Cynomys mexicanus*) colonies in northeastern Mexico. *BMC Ecology.* 16: 38.

Shyry, D. T., T. I. Wellicome, J. K. Schmutz, G. L. Erickson, D. L. Scobie, R. F. Russell, and R. G. Martin. 2001. Burrowing owl population-trend surveys in southern Alberta: 1991-2000. *J. Raptor Res.* 35: 310–315.

Skeel, M. A., J. Keith, and C. S. Palaschuk. 2001. A population decline recorded by Operation Burrowing Owl in Saskatchewan. *J. Raptor Res.* 35: 371–377.

Townsend Peterson, A., and A. G. Navarro-Sigüenza. 2006. Hundred-year changes in the avifauna of the Valley of Mexico, Distrito Federal, Mexico. *Huitzil. Revista Mexicana de Ornitología.* 7: 4–14.

Unikel, L. 1974. La dinámica de crecimiento de la Ciudad de México. *In: Ensayos sobre el desarrollo urbano de México.* Calnek, E. E., W. Borah, A. Moreno Toscano, K. A. Davies, y L. Unikel (eds.). México: Secretaría de Educación Pública. pp: 175–207.

Valencia-Maldonado, C., J. Arroyo-Ortega, A. Macías-Duarte, y F. I. Gastelum-Mendoza. 2016. Densidad poblacional de tecolote llanero occidental (*Athene cunicularia hypugaea*) en Hermosillo, Sonora, México. *Agroproductividad.* 9: 73–76.

Winter, S. L., and J. F. Cully. 2007. Burrowing owl associations with black.-tailed prairie dog colonies in southwestern Kansas and southeastern Colorado. *Prairie Naturalist.* 39: 69–75.

Witmer, G. W. 2005. Wildlife population monitoring: some practical considerations. *Wildl. Res.* 32: 259–263.

CAPÍTULO 3 . VEGETACIÓN DE SITIOS DE ANIDACIÓN DE TECOLOTE LLANERO OCCIDENTAL EN EL NORORIENTE DEL VALLE DE MÉXICO

RESUMEN

El tecolote llanero occidental (*Athene cunicularia hypugaea*) es una especie que se encuentra amenazada; su distribución incluye el centro de México, donde su hábitat (pastizales y áreas abiertas, en los que llega a ocupar madrigueras naturales, oquedades o estructuras artificiales para anidar) disminuye aceleradamente por el desarrollo urbano. El objetivo de este estudio fue caracterizar la vegetación de los sitios de anidación de tecolote llanero en el nororiente del Valle de México. De enero a julio del 2016 se establecieron transectos para localizar nidos en áreas agrícolas, urbanas y pastizales; durante mayo y julio del mismo año, con el método Daubenmire, se estimó la cobertura y altura de la vegetación de los sitios de anidación. El 78 % de las madrigueras fueron naturales, ubicándose la mayoría en zonas de pastizal. El porcentaje de cobertura de herbáceas, material muerto y de árboles fue similar en todos los sitios. La mayor superficie de suelo desnudo se presentó en los pastizales que fue el tipo de vegetación de mayor cobertura. La vegetación con menor altura se presentó en los sitios de anidación de pastizales (20.1 cm) y la mayor en las áreas agrícolas (72.4 cm). Los resultados de la cobertura vegetal y altura de los sitios de anidación resaltan la heterogeneidad de los hábitats ocupados por la especie.

Palabras clave: cobertura vegetal, altura de vegetación, método Daubenmire

INTRODUCCION

El tecolote llanero occidental (*Athene cunicularia hypugaea*) es un ave que se encuentra amenazada (Poulin *et al.*, 2011), y que se distribuye en Canadá, Estados Unidos y el norte y centro de México. Este búho habita principalmente en áreas abiertas, con pendientes suaves y vegetación dispersa (Klute *et al.*, 2003; Gervais *et al.*, 2008) y anida en madrigueras, cavidades naturales o estructuras artificiales, por lo que en su hábitat natural está asociado a la presencia de mamíferos cavadores (Holroyd *et al.*, 2001).

El hábitat tiene influencia fundamental en las actividades de cualquier especie, además, es necesario conocer a detalle sus características para poder tomar decisiones bien informadas relacionadas con el uso del suelo y la manipulación de hábitat (Rich, 1986).

Diversos estudios realizados con el fin de caracterizar la vegetación que rodea a las madrigueras del tecolote en pastizales de Estados Unidos han encontrado resultados variables sobre la cobertura vegetal. Por ejemplo, MacCracken *et al.*, (1985) y Rich (1986) señalan que en sitios de anidación, en Dakota del Sur e Idaho, los pastos y herbáceas cubren alrededor del 70 %, mientras que Green y Anthony (1989) y Plumpton y Lutz (1993) encontraron, en Oregón y Colorado, que el suelo desnudo abarcaba más del 50 % en los alrededores de las madrigueras. Sin embargo, la altura de la vegetación fue de 10 cm en los cuatro estudios anteriores. Estas características de la vegetación están relacionadas con la visibilidad de presas y depredadores (Green y Anthony, 1989; MacCracken *et al.*, 1985; Plumpton y Lutz, 1993; Rich, 1986). En México, los estudios sobre la vegetación que rodea las madrigueras de la especie son menos detallados. Así, en el norte de México, Rodríguez-Estrella y Ortega-Rubio (1993) mencionan que las madrigueras del tecolote se localizan principalmente en asociaciones de pastizales y matorral, mientras que en el centro del país Cruz-Carretero y

McDonnell (2005) y McDonnell y Cruz-Carretero (2006) indicaron que la especie anida en pastizales y áreas agrícolas.

Es en esta última región donde reside una población de tecolote llanero que se encuentra aislada genéticamente de las poblaciones del norte (Macias-Duarte, 2011), de la cual no se conocen sus límites geográficos. Además, dicha población se localiza en un área que actualmente está bajo un fuerte proceso de disturbio por el crecimiento poblacional humano y la construcción del Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, lo que está transformando el hábitat, y potencialmente el tamaño y estructura poblacional de esta especie.

Debido a lo anterior, el presente estudio tiene como objetivo caracterizar la vegetación de las madrigueras del tecolote llanero en la región central de México, particularmente del nororiente del Valle de México, donde se concentran los registros históricos de la especie (Townsend Peterson y Navarro-Sigüenza, 2006). Con esto se busca ampliar la información sobre sus requerimientos de hábitat y entender mejor su distribución.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El área de estudio forma parte del Valle de México y se localiza en la región oriental del Estado de México, aunque incluye fracciones pequeñas de Hidalgo, Tlaxcala y Ciudad de México (Figura 3.1). Comprende una superficie de 339 586 hectáreas, que abarca 63 municipios, de los cuales 44 tienen más de la mitad de su superficie dentro del área de estudio. Además, está delimitada por 19 microcuencas de la subcuenca hidrológica Pachuca- Ciudad de México (FIRCO - UAQ, 2005) que conforman una zona compacta donde se tienen registros históricos y actuales del tecolote llanero en el Valle de México.

La precipitación anual va de los 459 a 1041 mm, con un promedio de 646 mm (Fernández *et al.*, 2012). La temporada de lluvias se presenta de mayo a octubre; la precipitación en la época invernal corresponde al 5% de la anual. Debido a la orografía, las precipitaciones más altas se presentan en las zonas con mayor elevación y pendiente (Maderey, 1980). La temperatura anual va de los 6.4 a los 17.6 °C, con un promedio de 15.3 °C (Fernández *et al.*, 2012).

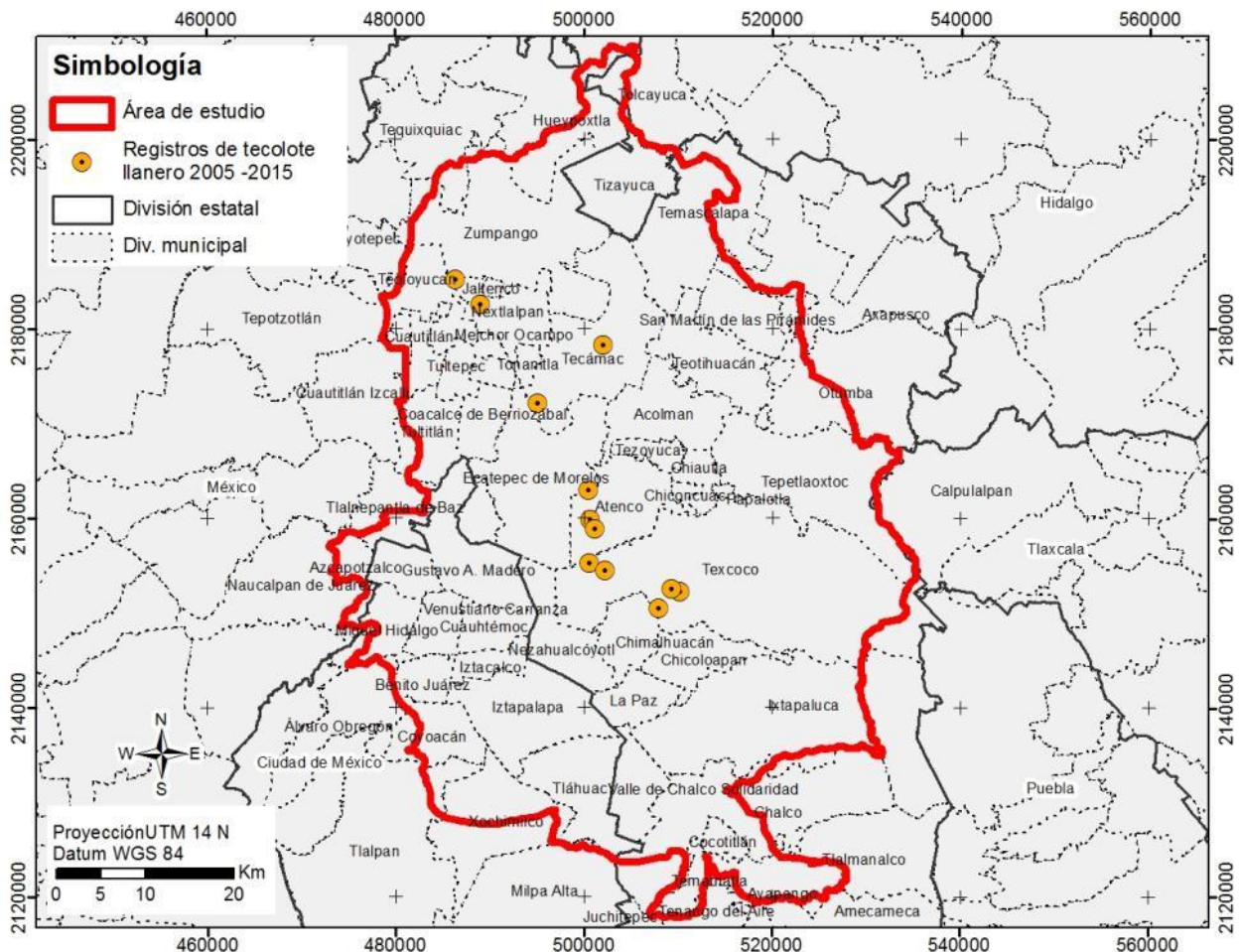


Figura 3.1. División municipal del oriente del Estado de México y demarcación del área de estudio de tequila llanero (*A. cunicularia*), año 2016.

De acuerdo con INEGI (2013) las áreas agrícolas (de riego y temporal) cubren casi la mitad de la superficie de la zona de estudio (45 %), seguido de las áreas urbanas (30 %), bosques (10 %) y pastizales (9 %), áreas sin vegetación aparente y matorral (2 % cada una) y cuerpos de agua, tular y vegetación halófila (2 %).

La zona de estudio ha tenido un fuerte crecimiento poblacional y desarrollo urbano; esto es, existe un flujo migratorio humano de las zonas rurales hacia la zona metropolitana en busca de mejores empleos y oportunidades, lo que ha generado la expansión de la mancha urbana y ha modificado el paisaje (Perevochtchikova, 2009).

Estimación de la altura y cobertura vegetal

De enero a julio del 2016 se implementaron, en el área de estudio, 89 transectos de 1 km de longitud por 200 m de ancho, los cuales fueron recorridos a pie a una velocidad aproximada de 3 km h⁻¹. Se visitaron en un horario de 07:30 h a 11:30 h (aproximadamente 4 horas después del amanecer) y de 17:00 a 20:00 h (aproximadamente 3 horas antes del anochecer), tiempo durante el cual los tecolotes pasan más tiempo en la entrada de sus nidos (Conway *et al.*, 2006). Por problemas logísticos, en algunas zonas no se recorrieron los transectos después de las 19:00 h. Se localizaron las madrigueras a lo largo de los transectos y se corroboró que estas estuvieran activas, mediante la presencia de egagrópilas, plumas o excremento fresco (Crowe y Longshore, 2013); además, se registraron sus coordenadas geográficas con un GPS Garmin Etrex ® 30.

Para evitar duplicar o repetir las mediciones de madrigueras muy cercanas entre sí, se tomaron en cuenta únicamente las madrigueras ocupadas que estaban separadas por más de 100 m (Crowe y Longshore, 2013; Mueller *et al.*, 2011).

Los sitios de anidación, entendido en este estudio como las características alrededor de las madrigueras, fueron clasificados de acuerdo al uso de suelo y vegetación en que fueron localizados: áreas de pastizal, agrícolas y urbanas. Se anotó el tipo de madriguera: si se trataba de una cavidad natural o una estructura artificial. Se estimó la cobertura vegetal mediante el método de Daubenmire (Green y Anthony, 1989; MacCracken *et al.*, 1985; Mueller *et al.*, 2011; Thiele *et al.*, 2013) modificado para incluir áreas agrícolas e infraestructura. Con base en este método, se establecieron cuatro transectos lineales de 50 metros, los cuales tuvieron como punto central la madriguera y fueron orientados hacia los puntos cardinales (Figura 3.2a). La cobertura vegetal fue calculada en porcentaje con un marco Daubenmire de 20x50 cm, a cada 5 m, a lo largo del transecto (Figura 3.2b), en las siguientes clases: pastos, hierbas, suelo desnudo, infraestructura humana, material muerto, áreas agrícolas y árboles y arbustos. Debido a que el crecimiento de la vegetación se presenta en diferentes estratos, la cobertura total obtenida mediante este método puede ser mayor al 100 %. Las áreas con suelo preparado para siembra, cultivos de maíz, avena, hortalizas y alfalfa en diferentes etapas de crecimiento, fueron conjuntadas como áreas agrícolas. La altura de la planta más alta dentro de cada marco Daubenmire fue medida en intervalos de 5 cm (Thiele *et al.*, 2013). En las áreas agrícolas la altura de la vegetación se estandarizó de acuerdo con la altura máxima registrada para cada cultivo (es decir, la altura en su etapa final de crecimiento).

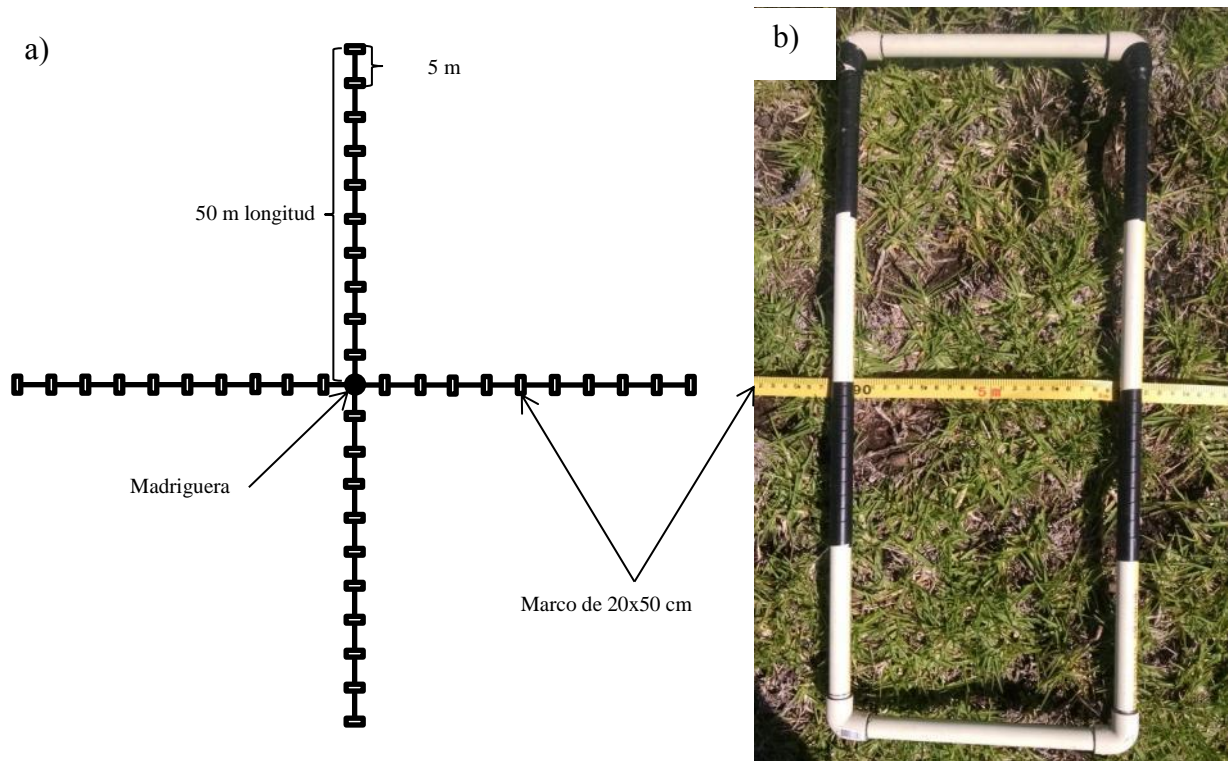


Figura 3.2.a) Establecimiento de transectos y marco Daubenmire alrededor de las madrigueras de tecolote llanero. b) Método Daubenmire para la estimación de la cobertura vegetal.

Análisis de datos

Los datos se analizaron mediante estadística descriptiva y se reportan como el promedio y desviación estándar de la cobertura y la altura de la vegetación. Asimismo, se usaron pruebas de comparaciones múltiples de Tukey para determinar si existían diferencias en la cobertura entre los tipos uso de suelo y vegetación en los que se ubicaban las madrigueras.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cobertura vegetal de los sitios de anidación de tecolote llanero

Se registraron 68 madrigueras activas, con una distancia mayor a 100 m entre ellas (Figura 3.3). Del total de las madrigueras, el 22% fueron cavidades artificiales y el 78% fueron naturales.

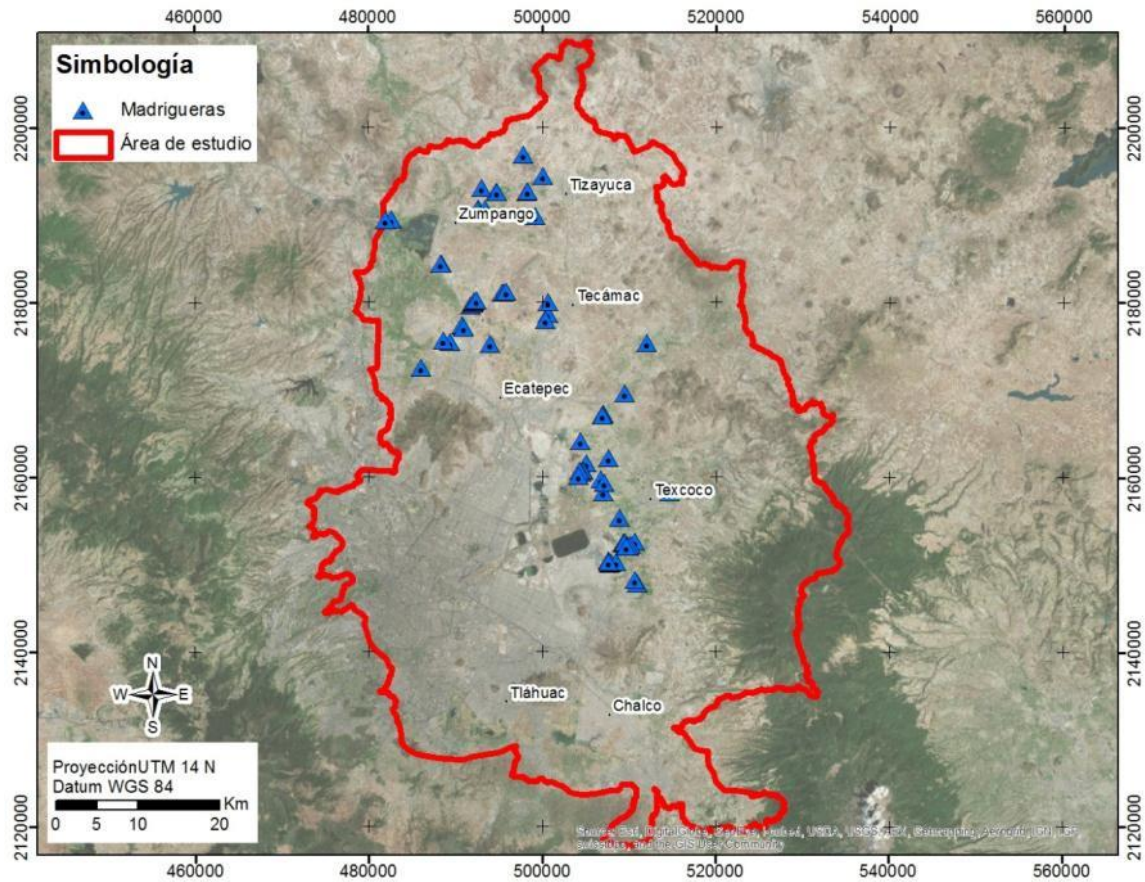


Figura 3.3. Madrigueras de tecolote llanero registradas en 2016 en el nororiente del Valle de México.

Las madrigueras artificiales se ubicaron en tuberías rotas, cajas de registros de drenaje y de agua de riego (Figura 3.4a y 3.4b). Aunque en los sitios de anidación de tecolote llanero en pastizales y áreas agrícolas (Figura 3.5) se observaron diferentes especies de mamíferos cavadores (p. ej., *Ictidomys mexicanus*, *Otospermophilus* spp. y *Cratogeomys merriami*), fue imposible determinar cuál fue responsable de la construcción de las madrigueras naturales que los tecolotes habitaban.



Figura 3.4. Madrigueras artificiales de tecolote llanero en el nororiente del Valle de México en 2016: a) caja de riego y b) tubería de riego rota.

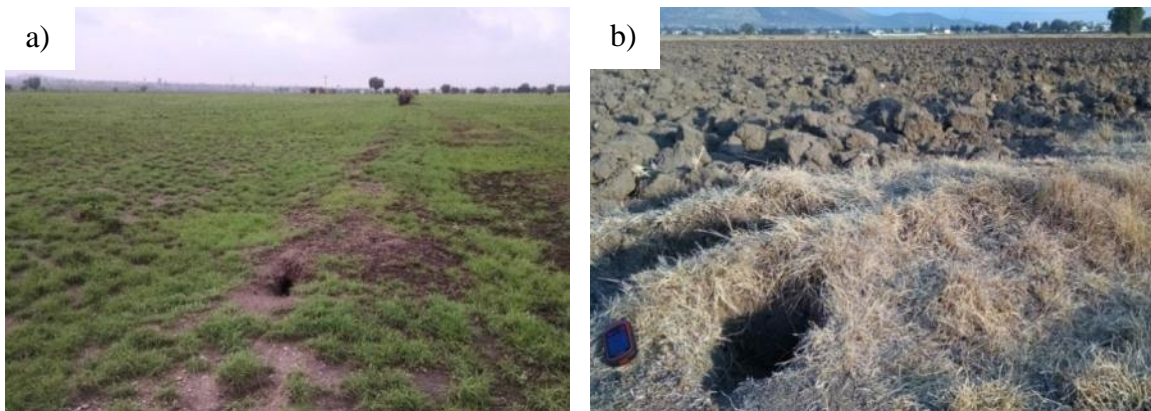


Figura 3.5. Madrigueras naturales utilizadas por tecolote llanero en el nororiente del Valle de México en 2016: a) madriguera en pastizal inducido, b) madriguera en área agrícola.

La mayoría de las madrigueras se localizaron en pastizales, mientras que la minoría en áreas agrícolas (Cuadro 3.1).

Cuadro 3.1. Número de madrigueras de tecolote llanero en áreas agrícolas, pastizales y áreas urbanas en el nororiente del Valle de México en 2016.

Uso de suelo	Número de madrigueras
Área agrícola	18
Pastizal	27
Área urbana	23

Debido a que los propietarios de los terrenos no otorgaron los permisos de entrada a todos los sitios se midió la cobertura y altura de la vegetación solo en 58 de las 68 madrigueras detectadas.

Las coberturas promedio de pastos, cultivos, suelo desnudo y superficies pavimentadas fueron diferentes entre los sitios de anidación de áreas agrícolas, pastizales y áreas urbanas y semiurbanas (Cuadro 3.2). De acuerdo con la prueba de Tukey para comparación de medias, las superficies de herbáceas, material muerto y árboles fueron iguales en las madrigueras localizadas en áreas agrícolas, pastizales y áreas urbanas y semiurbanas. La cobertura de pastos fue mayor en áreas de pastizal y también fue la cobertura predominante en todas las madrigueras. El suelo desnudo en pastizales y en áreas agrícolas presentó medias iguales; a su vez, las áreas agrícolas y urbanas también presentaron la misma media. La única diferencia significativa en cantidad de suelo desnudo fue entre áreas urbanas y pastizales, donde las segundas tuvieron mayor cantidad.

Cuadro 3.2. Cobertura promedio (%) de pastos, herbáceas, suelo desnudo, infraestructura y superficies pavimentadas, árboles y áreas agrícolas en sitios de anidación de tecolote llanero en el nororiente del Valle de México en 2016, de acuerdo con el uso de suelo y vegetación.

Tipo de cobertura	Cobertura Promedio (\pm Desviación estándar)		
	Agrícola	Pastizal	Urbano
Pastos	40.64 (\pm 18.66)b	75.15 (\pm 8.52)a	49.67 (\pm 12.69)b
Herbáceas	12.06 (\pm 10.21)a	13.26 (\pm 11.68)a	15.07 (\pm 8.88)a
Suelo desnudo	18.37 (\pm 12.35)a,b	22.75 (\pm 12.93)a	11.14 (\pm 7.76)b
Infraestructura y superficies pavimentadas	2.71 (\pm 5.22)b	0.48 (\pm 1.66)b	16.00 (\pm 11.23)a
Material muerto	2.76 (\pm 2.27)a	5.42 (\pm 4.72)a	4.77 (\pm 4.41)a
Áreas agrícolas	34.95 (\pm 23.68)b	0.00 (\pm 0.00)a	9.53 (\pm 13.17)a
Árbol	1.30 (\pm 2.51)a	0.02 (\pm 0.08)a	3.05 (\pm 7.8)a

Las medias de las variables con la misma letra no presentan diferencias significativas.

MacCracken *et al.* (1985) y Rich (1986) encontraron que la cobertura de pastos y herbáceas constituían el mayor porcentaje en los sitios de anidación en Dakota del Sur e Idaho, Estados Unidos, situación que se confirma en este estudio para los sitios de pastizal. Green y Anthony (1989), MacCracken *et al.* (1985) y Plumpton y Lutz (1993) encontraron un porcentaje de suelo desnudo mayor al 40 % en Oregón, Dakota del Sur y Colorado, respectivamente, mientras que en este estudio el mayor porcentaje de suelo desnudo fue de 22.7 % en madrigueras localizadas en pastizales. Los resultados del porcentaje de suelo desnudo en las madrigueras de áreas agrícolas son parecidos a los observados en los estudios de Lantz (2005) en Wyoming y Rich (1986), quienes encontraron un promedio de 17.9 y 19 % de suelo desnudo en pastizales, respectivamente. De acuerdo con Green y Anthony (1989) y Greger y

Hall (2009) una mayor cantidad de suelo desnudo alrededor de la madriguera permite a los tecolotes llaneros tener una mayor visibilidad para protegerse de depredadores, a la vez que facilita la detección de sus presas.

La altura promedio de la vegetación varió entre los sitios de anidación ubicados en áreas agrícolas, pastizales y áreas urbanas y semiurbanas de 20.1 cm en pastizales a 72.4 cm en áreas agrícolas (Cuadro 3.3).

Cuadro 3.3. Altura promedio de vegetación en los sitios de anidación de tecolote llanero en el nororiente del Valle de México de acuerdo al uso de suelo y vegetación, año 2016.

Uso de suelo	Altura promedio (cm)	Desviación estándar
Área agrícola	72.4	79.8
Pastizal	20.2	15.3
Área urbana	31.6	46.9

La altura promedio de la vegetación en los sitios de anidación de pastizal fue aproximadamente del mismo tamaño que el de un tecolote llanero; es decir, de 19 a 25 cm (Poulin *et al.*, 2011), que corresponde al uso de suelo que tiene la vegetación con menor altura y que potencialmente permitiría una mayor visibilidad de depredadores y presas. Al contrario, en las áreas agrícolas la altura promedio de la vegetación sobrepasó por casi tres veces la altura de un tecolote llanero. Estas áreas suelen presentar una mayor disponibilidad de presas (Botelho y Arrowood, 1996) debido a la heterogeneidad de la vegetación; sin embargo, no se ha reportado diferencia significativa en susceptibilidad a la depredación entre las áreas

agrícolas y las no agrícolas (Moulton *et al.*, 2006). En las áreas urbanas y semiurbanas la altura de la vegetación rebasó a la altura del tecolote llanero, debido a que estos sitios incluyen jardines y pequeñas áreas agrícolas. De acuerdo con Millsap y Bear (2000) en las áreas urbanas hay un aumento en la mortalidad debido a disturbios humanos.

En otros estudios la altura de la vegetación alrededor de las madrigueras fue menor a 10 cm, lo que posiblemente influye sobre la visibilidad de presas y depredadores (Green y Anthony, 1989; MacCracken *et al.*, 1985; Plumpton y Lutz, 1993; Rich, 1986). Sin embargo, la diferencia en la altura de la vegetación encontrada en dichos estudios y el presente puede deberse a que los primeros fueron realizados en colonias de perritos de las praderas, los cuales mantienen corta la vegetación por sus hábitos alimenticios (Ruiz-Ayma *et al.*, 2016).

En general, las diferencias entre la cobertura de suelo/vegetación y la altura reportadas en este estudio y de otros estudios previos (Green y Anthony, 1989; MacCracken *et al.*, 1985; Plumpton y Lutz, 1993; Rich, 1986) pueden deberse a que en estos últimos el método fue aplicado exclusivamente en ecosistemas de pastizales, mientras que el presente estudio incluyó áreas urbanas y agrícolas con diferentes sistemas de producción y etapas.

Por otro lado, los resultados de este estudio corroboraron la diversidad de hábitats ocupados por la especie, que abarcan áreas agrícolas, pastizales inducidos y áreas con infraestructura urbana; sin embargo este es sólo un aspecto de las características del hábitat en los sitios de anidación, ya que faltó realizar comparaciones con sitios que tuviesen características similares pero que no estuvieran habitados por la especie.

CONCLUSIONES

Las madrigueras de tecolote llanero registradas confirmaron que en el nororiente del Valle de México la especie habita en pastizales, áreas agrícolas y urbanas, y que la mayor parte de estas fueron naturales, localizándose principalmente en zonas de pastizales y en segundo lugar en áreas urbanas. La cobertura vegetal de herbáceas, material muerto y árboles fue igual con respecto a los tipos de usos de suelo donde se localizaron las madrigueras. La cobertura de pastos es predominante en los sitios localizados en áreas urbanas, agrícolas y pastizales. El suelo desnudo es mayor en los pastizales con respecto a las áreas urbanas. La altura de la vegetación estuvo en el rango de los 20 cm para pastizales a los 70 cm en áreas agrícolas. Las condiciones del hábitat encontradas reiteran la tolerancia del tecolote llanero a la presencia humana.

LITERATURA CITADA

Botelho, E. S., and P. C. Arrowood. 1996. Nesting success of western burrowing owls in natural and human-altered environments. In *Raptors in human landscapes: adaptations to built and cultivated environments*. Bird, D. M., A. E. Varland, and J. J. Negro. Academic Press. 61–68.

Conway, C. J., V. Garcia, M. D. Smith, L. A. Ellis, and J. L. Whitney. 2006. Comparative demography of burrowing owls in agricultural and urban landscapes in southeastern Washington. *J. Field Ornithol.* 77: 280–290.

Crowe, D. E., and K. M. Longshore. 2013. Nest site characteristics and nesting success of the Western Burrowing Owl in the eastern Mojave Desert. *J. Arid Environ.* 94: 113–120.

Cruz-Carretero, O., and K. McDonnell. 2005. Collaborative efforts to determine wintering grounds and habitat quality for burrowing owls (*Athene cunicularia*) in México. *Envirological Services*. Albuquerque, NM. 31 p.

Fernández, E. A., C. R. Romero y H. J. Zavala. 2012. *Atlas Climático Digital de México*. Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México. Extraído de: <http://uniatmos.atmosfera.unam.mx>.

FIRCO - UAQ. 2005. *Delimitación Nacional de Microcuencas*, escala 1:20,000.

Gervais, J. A., D. K. Rosenberg, and L. A. Comrack. 2008. Burrowing owl (*Athene cunicularia*). In *California Bird Species of Special Concern, Studies of Western Birds No. 1*. Shuford W. D. and T. Gardali (Eds). Pp: 218–226.

Green, G. A., and R. G. Anthony. 1989. Nesting success and habitat relationships of burrowing owls in the Columbia Basin, Oregon. *The Condor.* 91: 347–354.

Greger, P. D., and D. B. Hall. 2009. Burrow occupancy patterns of the western burrowing owl in southern Nevada. *West. N. Am. Nat.* 69: 285–294.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2013. Conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación, escala 1:250 000, serie V.

Klute, D. S., L. W. Ayers, M. T. Green, W. H. Howe, S. L. Jones, J. A. Shaffer, S. R. Sheffield, and T. S. Zimmerman. 2003. Status assessment and conservation plan for the western burrowing owl in the United States. U.S. Department of Interior, Fish and Wildlife Service, Biological Technical Publication FWS/BTO-R6001-2003, Washington, D.C. pp 108.

Lantz, S. J. 2005. Nesting ecology and habitat selection of western burrowing owls (*Athene cunicularia hypugaea*) in the thunder basin national grassland, northeastern Wyoming. University of Wyoming.

MacCracken, J. G., D. W. Uresk, and R. M. Hansen. 1985. Vegetation and soils of burrowing owl nest sites in Conata Basin, South Dakota. *The Condor.* 87: 152–154.

Macias-Duarte, A. 2011. Change in migratory behavior as a possible explanation for burrowing owl population declines in northern latitudes. The University of Arizona.

Maderey, R. L. E. 1980. Intensidad de la precipitación en el Valle de México. *Boletín Instituto de Geografía.* 10: 7–54.

McDonnell, K., and O. Cruz-Carretero. 2006. Use of radio-telemetry to determine wintering grounds of Burrowing Owls (*Athene cunicularia*). Albuquerque, NM.

Millsap, B. A., and C. Bear. 2000. Density and reproduction of burrowing owls along an urban development gradient. *J. Wildl. Manage.* 64: 33–41.

Moulton, C. E., R. S. Brady, and J. R. Belthoff. 2006. Association between wildlife and agriculture : underlying mechanisms and implications in burrowing owls. *J. Wildl. Manage.* 70: 708–716.

Mueller, M. S., M. M. Grigione, and R. J. Sarno. 2011. Nonurban habitat use of florida burrowing owls: identifying areas of conservation importance. *J. Raptor Res.* 45: 143–149.

Perevochtchikova, M. 2009. La situación actual del sistema de monitoreo ambiental en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. *Estudios Demográficos y Urbanos.* 24: 513–547.

Plumpton, D. L., and R. S. Lutz. 1993. Nesting habitat use by burrowing owls in Colorado. *J. Raptor Res.* 27: 175–179.

Poulin, R. G., L. D. Todd, E. A. Haug, B. A. Millsap, and M. S. Martell. 2011. Burrowing Owl (*Athene cunicularia*). *The Birds of North America Online.* 61.

Rich, T. 1986. Habitat and nest-site selection by burrowing owls in the sagebrush steppe of Idaho. *J. Wildl. Manage.* 50: 548–555.

Ruiz-Ayma, G., A. Olalla-Kerstupp, A. Macías-Duarte, A. Guzmán-Velasco, and J. I. González-Rojas. 2016. Population density of the western burrowing owl (*Athene cunicularia hypugaea*) in mexican prairie dog (*Cynomys mexicanus*) colonies in northeastern Mexico. *BMC Ecology.* 16: 38.

Thiele, J. P., K. K. Bakker, and C. D. Dieter. 2013. Multiscale nest site selection by burrowing owls in western South Dakota. *Wilson J. Ornithol.* 125: 763–774.

Townsend Peterson, A., and A. G. Navarro-Sigüenza. 2006. Hundred-year changes in the avifauna of the Valley of Mexico, Distrito Federal, Mexico. *Huitzil. Revista Mexicana de Ornitología.* 7: 4–14.

CONCLUSIONES GENERALES

Los resultados obtenidos en esta investigación aportan información sobre las zonas con mayor probabilidad de presencia del tecolote llanero, además de identificar los factores ambientales que influyen sobre la distribución de la especie en el centro de México, la abundancia de la población y las características de los sitios de anidación en la misma área.

De acuerdo con los modelos de regresión logística, lineal y máxima entropía las variables ambientales que están mayormente relacionadas con la presencia del tecolote llanero en el área de estudio son las climáticas y del suelo, mientras que las relacionadas con el uso de suelo e infraestructura influyeron menos. La precipitación del trimestre más cálido fue la variable de mayor importancia en los tres modelos, lo que puede deberse a la relación entre el aumento de la disponibilidad de presas, la temporada de reproducción y la temporada de lluvias.

De manera general, los modelos empleados concuerdan en la forma y ubicación de los sitios con mayor probabilidad de presencia de la especie. Los tres modelos tuvieron un desempeño aceptable y el de máxima entropía, a pesar de que es más útil cuando se cuenta únicamente con datos de presencia, fue el modelo con el mejor desempeño, de acuerdo con los estadísticos de evaluación y con el conjunto de datos de presencia/ausencia empleados.

Las estimaciones de abundancia muestran que la densidad en el Valle de México es mayor a la que ocurre en Alberta, Canadá, y se encuentra cerca del límite inferior del rango de las densidades estimadas para los Estados Unidos y el norte de México. Sin embargo, los resultados presentan un amplio intervalo de confianza, debido a que el conjunto de datos es pequeño.

Los resultados sobre las características de la vegetación en los sitios de anidación confirmaron que, en el área de estudio, reiteran la tolerancia del tecolote llanero a la presencia humana.

RECOMENDACIONES

Para complementar la información recabada en este estudio, se recomienda realizar un estudio que relacione la productividad de la especie con las características de los sitios de anidación.

Algunas acciones de conservación para la especie que pudieran implementarse son un manejo de patrones de agricultura que favorezcan la disponibilidad de presas. El uso de madrigueras artificiales en las áreas agrícolas favorecería la ocupación de otras superficies agrícolas; y la suplementación de alimentos durante la etapa de reproducción podría ayudar a aumentar la productividad de la especie.

Limitar el crecimiento de las áreas urbanas en el Valle de México ayudaría a disminuir la presión sobre el hábitat de la especie, y esto último es una acción que está propuesta por el Programa de Ordenación de la Zona Metropolitana del Valle de México (2012).