



CENTRO DE INVESTIGACIONES BIOLÓGICAS
DEL NOROESTE, S.C.

Programa de Estudios de Posgrado

ESTADO DE CONSERVACIÓN DE LA SERPIENTE DE CASCABEL
DE BAJA CALIFORNIA *Crotalus enyo*.

T E S I S

Que para obtener el grado de

Maestra en Ciencias

Uso, Manejo y Preservación de los Recursos Naturales
(Orientación en Ecología de Zonas Áridas)

P r e s e n t a

Tania Pérez Fiol

La Paz, Baja California Sur, agosto de 2022.

ACTA DE LIBERACIÓN DE TESIS

En la Ciudad de La Paz, B. C. S., siendo las **12:00** horas del día 14 del Mes de julio del 2022, se procedió por los abajo firmantes, miembros de la Comisión Revisora de Tesis avalada por la Dirección de Estudios de Posgrado y Formación de Recursos Humanos del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C., a liberar la Tesis de Grado titulada:

**"ESTADO DE CONSERVACIÓN DE LA SERPIENTE DE CASCABEL DE BAJA CALIFORNIA *Crotalus*
enyo"**

Presentada por la alumna:

TANIA PÉREZ FIOL

Aspirante al Grado de MAESTRO EN CIENCIAS EN EL USO, MANEJO Y PRESERVACIÓN DE LOS RECURSOS NATURALES CON ORIENTACIÓN EN **Ecología en Zonas Áridas**.

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron su **APROBACIÓN DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA



Dr. Gustavo Alberto Arnaud Franco
Director de Tesis



Dra. Patricia Galina Tessaro
Co-Tutor



Dr. José Jesús Sigala Rodríguez
Co-Tutor



Dra. Gracia Alicia Gómez Anduro,

Directora de Estudios de Posgrado y Formación de Recursos Humanos

La Paz, Baja California Sur, a 12 de julio de 2022.

Los miembros del comité de tesis la estudiante Tania Pérez Fiol del Programa de Maestría en Ciencias en el Uso, Manejo y Preservación de los Recursos Naturales, revisamos el contenido de la tesis y otorgamos el Vo.Bo. dado que la tesis no representa un plagio de otro documento como lo muestra el reporte de similitud realizado:

- Herramienta antiplagio:
Ithenticate
- Filtros utilizados:
No hay
- Porcentajes de similitud:
20%
Se muestra captura de pantalla

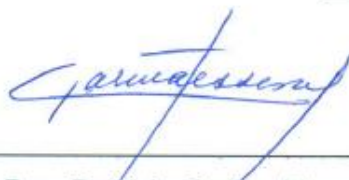
Estado de conservación de la serpiente de cascabel de Baja California Crotalus enyo

Citas incluidas Bibliografía incluida **20%**

RESUMEN DE COINCIDENCIAS

Rank	Source	Words	Similarity
1	Internet	552 palabras Copiado el 15-Nov-2021 www.conabio.gob.mx	3%
2	Internet	188 palabras Copiado el 19-Nov-2020 archive.org	1%
3	Internet	158 palabras Copiado el 03-Jul-2022 cibnor.repositorioinstitucional.mx	1%
4	Internet	151 palabras eprints.uanl.mx	1%
5	Internet	150 palabras Copiado el 22-May-2020 docplayer.es	1%
6	Internet	135 palabras hdl.handle.net	1%
7	Internet	127 palabras Copiado el 07-Ene-2018 www.fcbojed.mx	1%
8	Internet	114 palabras Copiado el 23-Jun-2021 repositorio.cibnor.mx	1%

Firmas del comité



Dra. Patricia Galina Tessaro



Dr. Gustavo Arnaud Franco



Dr. José Jesús Sigala Rodríguez

Conformación de Comités

Comité Tutorial

Dr. Gustavo Alberto Arnaud Franco
Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.
Director de Tesis

Dra. Patricia Galina Tessaro
Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.
Co-Tutora de Tesis

Dr. José Jesús Sigala Rodríguez
Universidad Autónoma de Aguascalientes
Co-Tutor de Tesis

Comité Revisor de Tesis

Dr. Gustavo Alberto Arnaud Franco
Dra. Patricia Galina Tessaro
Dr. José Jesús Sigala Rodríguez

Jurado de Examen

Dr. Gustavo Alberto Arnaud Franco
Dra. Patricia Galina Tessaro
Dr. José Jesús Sigala Rodríguez

Suplente

Dra. María del Carmen Blázquez Moreno

Resumen

El estado de conservación de una especie se refiere a la probabilidad que tienen sus poblaciones de persistir en el presente o en un futuro cercano. En la Península de Baja California (PBC), existen diversos factores que amenazan la conservación de las especies, principalmente por el aumento del desarrollo turístico y el cambio de uso de suelo. La serpiente de cascabel de Baja California (*Crotalus enyo*) es una especie endémica a México que, como su nombre lo indica, se distribuye exclusivamente en la PBC y sus islas adyacentes. Se tiene poca información sobre el estado actual de sus poblaciones, por lo que es de vital importancia la evaluación de su estado de conservación para poder establecer estrategias de conservación para la especie. El objetivo de este trabajo es determinar el estado de conservación de *C. enyo*, así como su distribución potencial y su categoría de rareza. Se modeló el nicho ecológico de *C. enyo* a escala regional utilizando el algoritmo de máxima entropía del software MaxEnt. Posteriormente, se determinó su estado de conservación mediante el uso de dos herramientas: el Método de Evaluación del Riesgo de Extinción de las Especies Silvestres en México (MER) de Sánchez *et al.* (2007) y el Índice de Vulnerabilidad Ambiental (EVS, por sus siglas en inglés) de Wilson *et al.* (2013). Por último, se determinó su categoría de rareza con base en la metodología de Rabinowitz (1981). Con las 234 localidades de colecta de *C. enyo* obtenidas, se analizó su distribución en las variables que se utilizaron en el modelo y se observó que prefiere temperaturas que se encuentran en un rango de temperatura media anual de 18-26 °C. En relación a la precipitación, alrededor del 60% de las colectas se encuentran en un rango de precipitación media anual entre 70-250 mm. Altitudinalmente, se observó que el 80% de las colectas están por debajo de los 500 msnm y la especie no se encuentra a altitudes mayores a los 943 msnm. *C. enyo* tuvo preferencia por el matorral sarcocaula y sarco-crasicaule, así como la selva baja caducifolia del sur de la PBC. Se determinó que la estacionalidad de la precipitación, el tipo de vegetación y uso de suelo y la precipitación del cuatrimestre más frío son las variables que más contribuyen a predecir la ocurrencia de *C. enyo*. En relación a su estado de conservación, con base en el EVS, se determinó que *C. enyo* tiene una distribución geográfica restringida, presenta un alto grado de persecución humana al ser una especie venenosa y su distribución ecológica es amplia, dado que se distribuye en 10 de las 14 ecorregiones de la PBC. Por lo anterior, *C. enyo* presenta vulnerabilidad media a la degradación ambiental. Con base en el MER, se determinó que *C. enyo* tiene una distribución muy restringida, su vulnerabilidad intrínseca es alta, el hábitat en donde se encuentra es limitante y el factor antropogénico tiene un bajo impacto sobre la especie. Por lo tanto, se catalogó como una especie Amenazada. Por último, se determinó que *C. enyo* es una especie rara, con categoría de rareza Alta Intermedia, al presentar rareza en dos de las tres variables que se analizaron (distribución geográfica reducida, tamaño poblacional pequeño y especificidad del hábitat amplia).

Palabras clave: *Crotalus enyo*, estado de conservación, modelado de nicho ecológico, rareza.

ORCID: 0000-0002-6014-911X



Dr. Gustavo Alberto Arnaud Franco
Director de Tesis

Summary

The conservation status of a species refers to the probability that its populations persist in the present or in the near future. In the Baja California Peninsula (BCP), there are several factors that threaten the conservation of species, mainly due to increased tourism development and land use change. The Baja California rattlesnake (*Crotalus enyo*) is a species endemic to Mexico that, as its name indicates, is distributed exclusively in the BCP and its adjacent islands. There is little information on the current status of its populations, so it is vitally important to evaluate its conservation status in order to establish conservation strategies for the species. The objective of this work is to determine the conservation status of *C. enyo*, as well as its potential distribution and its category of rarity. The ecological niche of *C. enyo* was modeled at a regional scale using the maximum entropy algorithm of the MaxEnt software. Subsequently, its conservation status was determined using two tools: the Extinction Risk Assessment Method for Wild Species in Mexico (MER, by its Spanish acronym) by Sánchez *et al.* (2007) and the Environmental Vulnerability Score (EVS) by Wilson *et al.* (2013). Finally, its category or rarity was determined based on the methodology of Rabinowitz (1981). Using 234 collection localities for *C. enyo*, we analyzed its distribution and the variables used in the model. It was observed that it prefers temperatures that are in a range of mean annual temperature of 18-26 °C. Around 60% of the collections are in a range of average annual precipitation between 70 and 250 mm. Altitudinally, it was observed that 80% of the collections are below 500 meters above sea level and the species is not found at altitudes higher than 943 meters. *C. enyo* had a preference for the sarcocaule and sarco-crasicaule scrub, as well as the tropical deciduous forest of the south of the BCP. It was determined that the seasonality of precipitation, the type of vegetation and land use, and the precipitation of the coldest four-month period are the variables that contribute more to predicting the occurrence of *C. enyo*. In relation to its conservation status, based on the EVS, it was determined that *C. enyo* has a restricted geographical distribution, it presents a high degree of human persecution as it is a poisonous species and its ecological distribution is wide, given that it is distributed in 10 of the 14 ecoregions of the BCP. Due to the above, *C. enyo* presents medium vulnerability to environmental degradation. Based on the MER, it was determined that *C. enyo* has a very restricted distribution, its intrinsic vulnerability is high, the habitat where it is found is limiting, and the anthropogenic factor has a low impact on the species. Therefore, it was listed as a Threatened species. Finally, it was determined that *C. enyo* is a rare species, with a High Intermediate category of rarity, presenting rarity in two of the three variables that were analyzed (reduced geographic distribution, small population size, and broad habitat specificity).

Key words: *Crotalus enyo*, conservation status, ecological niche modeling, rarity.

ORCID: 0000-0002-6014-911X



Dr. Gustavo Alberto Arnaud Franco
Director de Tesis

Dedicatoria

A mi Papá Miguel

A mi Mamá Reyna

A mi Hermano Paúl

A mi Sobrina Pauleth

A mis amigas

A Timo, mi compañero fiel

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por otorgar la beca No. 743211 para poder realizar mis estudios de Posgrado.

Al Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. (CIBNOR) por darme la oportunidad de cursar la Maestría en Ciencias en el Uso, Manejo y Preservación de los Recursos Naturales y por los apoyos otorgados para poder continuar con mis estudios de Posgrado.

A la Dirección de Estudios de Posgrado y Formación de Recursos Humanos del CIBNOR por el apoyo otorgado durante la maestría.

A mi Director de Tesis, Dr. Gustavo Alberto Arnaud Franco por su apoyo incondicional durante toda la investigación. Infinitas gracias por sus consejos, su paciencia, por estar al pendiente de mí, por darme ánimos cuando lo necesitaba y por impulsarme a mejorar siempre. Gracias por compartir su amor hacia las serpientes de cascabel y darme la oportunidad de trabajar con ellas.

A mis Co-Tutores, Dra. Patricia Galina Tessaro y Dr. José Jesús Sigala Rodríguez por su apoyo y sus valiosos comentarios y sugerencias, los cuales ayudaron a enriquecer y mejorar este trabajo de investigación.

A los técnicos del Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica del CIBNOR por su apoyo y asesorías.

A mi amiga Carolina por su apoyo incondicional y por sus enseñanzas que ayudaron a mejorar los mapas de este trabajo.

A mis amigos Valeria y Carlos por su compañía, por todas las palabras de apoyo, las risas, las buenas anécdotas mientras conocíamos nuevos spots por la Baja, las pajareadas, los cafés y mates compartidos. Gracias por compartirme su amor y conocimientos sobre las aves y los cactus de la región.

A mis Padres Miguel y Reyna por su amor y cariño incondicional, por todo su apoyo durante este proceso, por siempre creer en mí y en mis capacidades. Todo lo que he logrado es gracias a ustedes.

A mis amigas Paola, Itzayanna y Mariana por todas sus palabras de apoyo, por acompañarme en todas las etapas importantes de mi vida, en las buenas y en las malas, siempre. Gracias por ser mis hermanas del alma.

A mi amigo Karl por todas sus palabras de apoyo y darme ánimos cuando lo necesité.

Y a Timo, mi peludo de cuatro patas, mi compañero fiel durante las noches de desvelo, que siempre me llevabas tu juguete para que me distrajera un rato, gracias por hacer mi vida más feliz.

Contenido	
Resumen	i
Summary	ii
Dedicatoria	iii
Agradecimientos	iv
Contenido	vi
Lista de figuras	ix
Lista de tablas	x
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	3
2.1 Conservación de reptiles: generalidades	3
2.2 Serpientes de cascabel	4
2.3 Serpiente de cascabel de Baja California <i>Crotalus enyo</i> (Cope, 1861).....	5
2.3.1 Descripción	5
2.3.2 Distribución	6
2.3.3 Variación geográfica	6
2.3.4 Hábitat	7
2.3.5 Actividad.....	8
2.3.6 Dieta	8
2.3.7 Reproducción	9
2.3.8 Estado de conservación.....	9
2.4 Métodos de evaluación del riesgo de extinción de especies.....	10
2.4.1 Método de evaluación de riesgo de extinción de las especies silvestres en México (MER).....	10
2.4.2 Índice de vulnerabilidad ambiental (EVS)	11
2.5 Rareza de especies	12
2.6 Modelación de nicho ecológico	13
3. JUSTIFICACIÓN	15
4. HIPÓTESIS	16
5. OBJETIVOS	17
5.1 Objetivo general	17
5.2 Objetivos particulares	17
6. MATERIAL Y MÉTODOS	18
6.1. Área de estudio	18
6.2 Modelación de nicho ecológico	20
6.2.1 Localidades de colecta	20
6.2.2 Variables ambientales	21
6.2.3 Construcción y evaluación de los modelos	23
6.2.4 Construcción del modelo final	24
6.3 Evaluación del estado de conservación	24
6.3.1 Índice de vulnerabilidad ambiental (EVS)	24
6.3.2 Método de evaluación de riesgo de extinción de las especies silvestres en México (MER).....	26
6.4 Análisis de rareza.....	27
7. RESULTADOS	30
7.1 Modelado de nicho ecológico	30

7.1.1	Localidades de colecta	30
7.1.2	Variables ambientales	31
7.1.3	Construcción y evaluación de los modelos	34
7.1.4	Modelo de nicho ecológico	36
7.2	Evaluación del estado de conservación	37
7.2.1	Índice de vulnerabilidad ambiental (EVS)	37
7.2.1.1	Distribución geográfica	37
7.2.1.2	Distribución ecológica	37
7.2.1.3	Grado de persecución humana	39
7.2.2	Método de evaluación de riesgo de extinción de las especies silvestres en México (MER)	40
7.2.2.1	Nombre científico válido, citado por la autoridad taxonómica	40
7.2.2.1.1	Nombres científicos sinónimos	40
7.2.2.1.2	Subespecies	41
7.2.2.1.3	Nombres comunes	41
7.2.2.1.4	Clasificación taxonómica	41
7.2.2.2	Evaluación	41
7.2.2.2.1	Criterio A. Amplitud de la distribución de <i>Crotalus enyo</i> en México	41
7.2.2.2.1.1	Descripción de la distribución	42
7.2.2.2.1.2	Método de elaboración del mapa y evaluación del tamaño relativo de la distribución	42
7.2.2.2.2	Criterio B. Estado del hábitat con respecto al desarrollo natural de <i>Crotalus enyo</i>	43
7.2.2.2.2.1	Antecedentes (tipo de hábitat que ocupa la especie)	43
7.2.2.2.2.2	Análisis diagnóstico del estado actual del hábitat	44
7.2.2.2.2.3	Evaluación del estado actual del hábitat con respecto a las necesidades naturales del taxón	46
7.2.2.2.3	Criterio C. Vulnerabilidad biológica intrínseca de <i>Crotalus enyo</i>	46
7.2.2.2.3.1	Antecedentes (historia de vida) de la especie	46
7.2.2.2.3.2	Análisis diagnóstico del estado actual de la especie	48
7.2.2.2.3.3	Evaluación de qué factores la hacen vulnerable	49
7.2.2.2.4	Criterio D. Impacto de la actividad humana sobre <i>Crotalus enyo</i>	49
7.2.2.2.4.1	Factores de riesgo reales y potenciales con la importancia relativa de cada uno de ellos	49
7.2.2.2.4.2	Análisis pronóstico de la especie	50
7.2.2.2.4.3	Evaluación del impacto	50
7.2.2.2.5	Valor asignado total del MER (Suma de los valores de los criterios A + B + C + D)	51
7.3	Análisis de rareza	51
7.3.1	Distribución geográfica	51
7.3.2	Especificidad del hábitat	52
7.3.3	Tamaño de la población local	53
8.	DISCUSIÓN	54
8.1	Modelo de nicho ecológico de <i>Crotalus enyo</i>	54
8.2	Estado de conservación de <i>Crotalus enyo</i>	59
8.3	Análisis de rareza de <i>Crotalus enyo</i>	62

9. CONCLUSIONES	64
9.1 Recomendaciones	66
9.1.1 Relevancia de la especie.....	66
9.1.2 Recomendaciones para la conservación de la especie	66
10. LITERATURA CITADA	68

Lista de figuras

Figura 1. Serpiente de cascabel de Baja California <i>Crotalus enyo</i>	6
Figura 2. Comportamiento arbóreo de <i>Crotalus enyo</i> observado en la región del Cabo.....	8
Figura 3. Ubicación del área de estudio.....	18
Figura 4. Ecorregiones de la Península de Baja California.	20
Figura 5. Efecto en la predicción logística de las variables continuas principales que afectan la distribución de <i>Crotalus enyo</i> en el modelo	33
Figura 6. Efecto en la predicción logística de la variable categórica que más afecta la distribución de <i>Crotalus enyo</i> en el modelo.....	34
Figura 7. Predicción de la distribución y probabilidad de ocurrencia de <i>Crotalus enyo</i> , utilizando el modelo de máxima entropía.	36
Figura 8. Distribución de los registros de presencia de <i>Crotalus enyo</i> en las ecorregiones de la Península de Baja California.	38
Figura 9. Distribución de <i>Crotalus enyo</i> en la Península de Baja California.	43

Lista de tablas

Tabla 1. Variables utilizadas para la construcción de los modelos de nicho.....	22
Tabla 2. Primera escala del Índice de Vulnerabilidad Ambiental (EVS).....	24
Tabla 3. Segunda escala del Índice de Vulnerabilidad Ambiental (EVS).....	25
Tabla 4. Tercera escala del Índice de Vulnerabilidad Ambiental (EVS).	25
Tabla 5. Criterios del Método de Evaluación de Riesgo de Extinción de las Especies (MER).....	26
Tabla 6. Tipología de especies raras.	28
Tabla 7. Categorías de rareza.....	28
Tabla 8. Descripción cuantitativa de las variables observadas en las localidades de colecta de <i>C. enyo</i>	31
Tabla 9. Porcentaje de la contribución relativa de las variables utilizadas en la modelación de nicho.....	32
Tabla 10. Comparación de los indicadores de desempeño de las diferentes réplicas para cada modelo.	35
Tabla 11. Registros de presencia de <i>Crotalus enyo</i> por ecorregión de la Península de Baja California.	39
Tabla 12. Evaluación del estado de conservación de <i>Crotalus enyo</i> mediante el EVS.	40
Tabla 13. Evaluación del estado de conservación de <i>Crotalus enyo</i> mediante el MER.....	51
Tabla 14. Evaluación de la categoría de rareza de <i>Crotalus enyo</i>	51

1. INTRODUCCIÓN

El estado de conservación de una especie se refiere a la probabilidad que tienen sus poblaciones de mantenerse en el presente y nos indica su riesgo de extinción en un futuro cercano (UICN, 2012a; UICN, 2012b). Conservar la biodiversidad se enfoca primordialmente en el mantenimiento de la diversidad de especies y las funciones de los ecosistemas (Thompson, 1997), pero la conservación también es clave para el bienestar y desarrollo humano (Moreno, 2004; Varea, 2004). En este contexto, el objetivo principal de la investigación del estado de conservación de las especies es beneficiar a la diversidad biológica mediante el conocimiento de la riqueza natural, la identificación de mecanismos y patrones, así como la cuantificación de cambios para reconocer problemáticas y procurar soluciones (Moreno, 2004; Robinson, 2006; Sutherland *et al.*, 2009).

En México, la fauna de reptiles es uno de los componentes de biodiversidad más importantes del país (Flores y García, 2014), la cual representa el 7.8% de los reptiles del mundo, por lo cual se posiciona en segundo lugar en riqueza de este grupo; también presentan un alto grado de endemismo, con un 57% de especies endémicas al territorio nacional (Flores y García, 2014; Uetz, 2019). Los reptiles son un grupo de gran relevancia para la conservación biológica puesto que desempeñan papeles fundamentales en los ecosistemas (Böhm *et al.*, 2013), y son de importancia médica (Tay *et al.*, 2002), cultural (Ávila *et al.*, 2018), económica y alimenticia (Flores-Villela, 1980).

Entre los reptiles, las serpientes de cascabel son un elemento importante de los ecosistemas donde habitan (Grismer, 2002). Sin embargo, debido a sus rasgos biológicos tales como crecimiento lento, número reducido de crías, tasas metabólicas lentas y requerimientos de energía relativamente bajos, son especies vulnerables a las actividades antropogénicas y a los cambios climáticos, en particular las especies con distribuciones restringidas (Arnaud, 2015; Maritz *et al.*, 2016). A pesar de ser las serpientes de cascabel el grupo más estudiado a nivel mundial (Beaman y Hayes, 2008), en el noroeste de México son escasos los estudios que detallen su biología, ecología y estado de conservación (Grismer, 2002; Lovich *et al.*, 2009; Arnaud, 2015). Para especies como la serpiente de cascabel de Baja California (*Crotalus enyo*), la falta de información básica acerca del estado de sus poblaciones ha impedido una evaluación

precisa de su estado de conservación (Estrada-Hernández, 2010). Se le ha considerado como una especie rara en gran parte de su distribución (Arnaud, comunicación personal, de acuerdo con datos de campo), debido a su escasa abundancia y a que suele ser difícil de localizar en campo (Carbajal-Márquez, 2013).

Una especie se cataloga como 'rara' de acuerdo con su extensión geográfica, abundancia local y especificidad del hábitat (Rabinowitz, 1981). Las especies raras tienden a ser especialmente sensibles a la alteración del hábitat, lo que las convierte en objetivos importantes para la conservación (Birskis *et al.*, 2019). Estudiar la rareza de las especies nos brinda información acerca de la biodiversidad y favorece la planificación de actividades conservacionistas (Rey, 2009).

Para estudiar las especies consideradas como raras, o para hacer un análisis de su conservación, el uso de herramientas tecnológicas ha sido de gran utilidad, entre ellas los sistemas de información geográfica (SIG) (Santos *et al.*, 2006). Los SIG permiten elaborar modelos ecológicos para determinar áreas con la mejor idoneidad de hábitat para especies con riesgo de extinción (Santos *et al.*, 2006; Halama *et al.*, 2008). Para apoyar la identificación del hábitat adecuado para especies vulnerables, se han desarrollado modelos estadísticos multivariados conocidos como 'modelos de nicho ecológico', los cuales vinculan la presencia de la especie con una serie de variables ambientales que puedan influir en su distribución (Santos *et al.*, 2006; Papes y Gaubert, 2007; Halama *et al.*, 2008). Estos modelos ayudan a los investigadores a localizar sitios con poblaciones existentes de la especie, seleccionarlos para preservarlas en caso de que haya individuos presentes, y poder llevar a cabo reubicaciones (Halama *et al.*, 2008).

A pesar de que se han realizado estudios sobre la conservación de *C. enyo* (Arnaud, 2015), el conocimiento sobre su biología, ecología y estado poblacional sigue siendo escaso. Se encuentra incluida en la Lista Roja de Especies Amenazadas de la UICN bajo la categoría de Preocupación Menor (LC) y en la lista de especies en riesgo de la NOM-059-SEMARNAT-2010 bajo la categoría de Amenazada (Hollingsworth y Frost, 2007; SEMARNAT, 2019; IUCN, 2020). En este trabajo se determinó el estado de conservación actual de *C. enyo* en la Península de Baja California. Esto permitirá identificar problemáticas para la conservación de la especie; así mismo, apoyará la planificación de estrategias para su conservación en México.

2. ANTECEDENTES

2.1 Conservación de reptiles: generalidades

Los reptiles son un grupo de vertebrados muy diverso que comprenden a las serpientes (Serpentes), lagartijas (Sauria), tortugas (Testudines), cocodrilos (Crocodylia), anfisbénidos (Amphisbaenia) y tuátaras (Rhynchocephalia; Vitt y Caldwell, 2014). Tienen una larga y compleja historia evolutiva, la cual se remonta al periodo Carbonífero, hace más de 250 millones de años (Hedges y Poling, 1999; Vitt y Caldwell, 2014; Ettlting y Schmidt, 2015). Los reptiles se han adaptado a una gran variedad de climas tropicales, desérticos y templados, así como a ambientes marinos, de agua dulce y terrestres (Böhm *et al.*, 2013; Vitt y Caldwell, 2014). Esta adaptabilidad les ha permitido ocupar casi todos los hábitats del mundo (a excepción de las regiones polares); por lo tanto, el papel que desempeñan en los ecosistemas es de vital importancia. Son especies comensales, dispersoras de semillas, depredadoras y presas; también son bioindicadores de la salud del ecosistema debido a que, regularmente, tienen asociaciones específicas de microhábitat (Böhm *et al.*, 2013). Si los comparamos con otros vertebrados como los mamíferos y las aves, los reptiles generalmente son de baja movilidad y tienen rangos de distribución más estrechos, por lo que son particularmente vulnerables a los cambios ambientales y al factor antropogénico (Böhm *et al.*, 2013; Ettlting y Schmidt, 2015).

La disminución global de las poblaciones de reptiles es uno de los factores que más ha contribuido a la pérdida de biodiversidad en el mundo (Wilson *et al.*, 2013, Böhm *et al.*, 2013). De acuerdo con diversos estudios, las principales causas del declive de sus poblaciones son la fragmentación del hábitat, contaminación ambiental, colecta excesiva (tráfico ilegal de especies), las especies introducidas y el cambio climático, siendo la fragmentación del hábitat por actividades agrícolas la de mayor impacto (Wilson *et al.*, 2013; Böhm *et al.*, 2013; Ettlting y Schmidt, 2015; IUCN, 2020). Acorde al estudio de Böhm *et al.* (2013), las regiones tropicales son las que están registrando las tasas más aceleradas de pérdida de hábitat; también son las regiones donde se concentra la mayor riqueza de reptiles.

La falta de información acerca del estado de conservación de un gran número de especies de reptiles ha sido reportada por diversos autores (Böhm *et al.*, 2013; Ettlting y Schmidt, 2015). De

las 11,050 especies de reptiles descritas en el mundo de acuerdo con The Reptile Database (Uetz, 2019), sólo 6,671 (60.4%) han sido evaluadas por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) y se encuentran en la Lista Roja de Especies Amenazadas (IUCN, 2020); de las cuales el 78.4% (5,230 spp.) están catalogadas como de menor riesgo de extinción y un total de 1,408 spp. (21.1%) se encuentran amenazadas bajo las categorías de Vulnerable (VU; 535 spp.), En Peligro (EN; 564 spp.) y En Peligro Crítico (CR; 309 spp.). También están registradas 30 especies Extintas (EX) en el mundo y tres como Extintas en Estado Silvestre (EW; IUCN, 2020).

Respecto a su estado de conservación, los reptiles son motivo de preocupación en México. Hasta octubre de 2013, se estimaba que existían 864 especies (Flores y García, 2014), de las cuales 445 se encontraban en la lista de especies en riesgo de la Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010 (SEMARNAT, 2019), lo que representa más del 50% de las especies del país. El crecimiento poblacional y el uso insostenible de los recursos naturales han sido las principales causas del incremento de las amenazas antropogénicas a los reptiles de México (Wilson *et al.*, 2013).

2.2 Serpientes de cascabel

Las serpientes de cascabel forman parte de la familia Viperidae; subfamilia Crotalinae, la cual cuenta con 35 géneros y 361 especies en el mundo (Uetz, 2020). Las especies de esta familia son venenosas y poseen colmillos largos y huecos, los cuales están anclados a un maxilar corto y móvil (Grismer, 2002). La subfamilia Crotalinae presenta la mayor riqueza de especies; contiene 21 géneros y 255 especies (Uetz, 2020), y se extiende principalmente en América y Asia (Grismer, 2002). Las serpientes crotalinas se caracterizan por tener dos fosetas entre la nariz y cada ojo, que funcionan como receptoras de calor. Esto les ayuda a detectar presas y llevar a cabo sus ataques durante periodos de baja intensidad lumínica. En la Península de Baja California y sus islas adyacentes, los crotalinos están adaptados a las condiciones de aridez de la región (Grismer, 2002). La riqueza del área está representada por 15 especies del género *Crotalus*. En comparación con otras serpientes, las crotalinas están significativamente más

amenazadas, principalmente a causa de la pérdida de hábitat y a la persecución humana (Maritz *et al.*, 2016).

El género *Crotalus* se caracteriza principalmente por tener un cascabel verdadero en el extremo final de la cola, compuesto por una serie de segmentos, que generalmente utilizan las serpientes en el repertorio de su comportamiento defensivo (Grismer, 2002; Campbell y Lamar, 2004). Los crótalos ocupan una gran variedad de hábitats, los cuales van desde bosques templados hasta los desiertos áridos. Algunas especies tienen rangos de distribución amplios y son generalistas del hábitat, mientras que otras pueden tener distribuciones restringidas al ser especialistas de microhábitat (Grismer, 2002).

2.3 Serpiente de cascabel de Baja California *Crotalus enyo* (Cope, 1861)

2.3.1 Descripción

La serpiente de cascabel de Baja California (*Crotalus enyo*) es un vipérido que alcanza una longitud máxima de 90 cm en estado adulto. Se le caracteriza por poseer una cabeza pequeña, la cual se distingue poco del cuello (Fig. 1), a diferencia de otras serpientes de cascabel que tienen la cabeza triangular. Sus ojos son relativamente pequeños, con pupilas elípticas. Su cola es relativamente corta y está compuesta de 4 a 8 anillos de color marrón. Su coloración del dorso es similar a la del sustrato y va del bronceado pálido al marrón claro u oscuro, marrón grisáceo o gris plateado. El patrón dorsal se compone de 28 a 42 manchas de color rojizo o café amarillento, con borde oscuro. Estas manchas tienen formas que van de rectangulares en la parte anterior, a hexagonales en la mitad del cuerpo y elongadas en la parte posterior. Generalmente el espacio entre las manchas es más claro que su dorso. En la parte superior de la cabeza tiene dos pares de manchas grandes distintivas, de color marrón oscuro. El par anterior usualmente es más pequeño y se inclina más hacia los costados de la cabeza, mientras que el par posterior es más grande y se alarga hasta la zona del cuello. El vientre usualmente es de color crema y puede estar muy moteado. En los recién nacidos, el patrón de coloración es muy vívido (Grismer, 2002; Ramírez y Arizmendi, 2004).



Figura 1. Serpiente de cascabel de Baja California *Crotalus enyo*. Autoría propia.

2.3.2 Distribución

Crotalus enyo es una especie endémica a México, la cual se extiende por la mayor parte de la Península de Baja California, en los estados de Baja California y Baja California Sur. Se encuentra desde las cercanías de Cabo Colonet en la costa del Pacífico al norte de la península, hasta la región del Cabo en el sur. También se le conoce en las Islas Magdalena y Santa Margarita en el Océano Pacífico, y en las islas del Carmen, Cerralvo, Coronados, Espíritu Santo, Partida Sur, San Francisco, San José y San Marcos del Golfo de California (Grismer, 2002) (Fig. 9).

2.3.3 Variación geográfica

En la actualidad se reconocen tres subespecies de *Crotalus enyo*: *C. e. enyo*, *C. e. furvus* y *C. e. cerralvensis* (Beaman y Grismer, 1994). La subespecie *furvus* se encuentra desde Cabo Colonet en el norte de Baja California, hasta un poco más al sur de El Rosario. Al sur de su distribución, *furvus* se intercala con la subespecie *enyo* durante aproximadamente 60 km. En general, los individuos de *furvus* tienden a ser más oscuros que *enyo* en su coloración dorsal. Al norte de Bahía de los Ángeles, los individuos de *enyo* suelen ser de color muy claro. En el desierto de Vizcaíno a menudo son de coloración más oscura. En las planicies de Magdalena son un poco descoloridos y tienden a tener un tono rosado lateralmente; un patrón similar se ha observado en especímenes localizados en San Juan de los Planes en la región del Cabo. La subespecie

cerralvensis, de la Isla Cerralvo, suele tener un patrón de manchas más distintivo y colorido. En algunos ejemplares, las manchas son de color marrón claro y en otros son de un color marrón grisáceo. Generalmente, la coloración de las serpientes adultas de *cerralvensis* tiende a parecerse a los individuos juveniles de las poblaciones peninsulares del norte (Beaman y Grismer, 1994; Grismer, 2002).

2.3.4 Hábitat

Crotalus enyo se encuentra en diversos hábitats extendiéndose en la mayor parte de la Península de Baja California, solamente está ausente de las regiones extremadamente áridas del noreste. En el norte, habita el matorral de las mesetas costeras donde se le encuentra entre la vegetación baja. Suele ser común en las regiones costeras más frías del Pacífico, asociadas a las planicies de Magdalena y el desierto de Vizcaíno. En esta región, generalmente está asociada a los matorrales y rocas. Así mismo, es bastante común en la región tropical-árida de la península. No se le ha reportado en los bosques de coníferas de la Sierra La Laguna y es escasa a lo largo de las lomas aledañas. Esta serpiente es común en las cercanías de viviendas humanas. También se han reportado observaciones de individuos en madrigueras, debajo de las rocas, debajo y dentro de la maleza, y en dunas de arena. Se le puede localizar desde el nivel del mar hasta los 900 msnm (Grismer, 2002; Estrada-Hernández, 2010).

Carbajal-Márquez (2013) menciona que en la región del Cabo se le encuentra mayormente en arbustos de las selvas bajas (Fig. 2); también se le ha visto en suelo desnudo, rocas, pendientes, herbáceas, suculentas y materia vegetal en descomposición, principalmente entre los 400-499 msnm.



Figura 2. Comportamiento arbóreo de *Crotalus enyo* observado en la región del Cabo.
Autoría propia.

2.3.5 Actividad

En la región del Cabo, *Crotalus enyo* está activa durante todo el año, con mínima actividad durante los meses de diciembre y enero. Al norte del desierto de Vizcaíno suele estar inactiva durante el invierno. Generalmente, el periodo de actividad para *C. enyo* va desde finales de marzo hasta principios de noviembre. El periodo de mayor actividad es durante los meses de septiembre y octubre, principalmente desde el sur de Bahía de los Ángeles. Durante el verano, generalmente es de hábitos nocturnos, mientras que en la primavera es diurna y nocturna (Grismer, 2002). Grismer (2002) ha reportado observar individuos activos durante las noches frías de otoño en el centro de Baja California.

2.3.6 Dieta

Crotalus enyo se alimenta principalmente de mamíferos pequeños y lagartijas, pero hay reportes en la literatura de que los individuos adultos también se pueden alimentar de ciempiés del género *Scolopendra* (Taylor, 2001). A diferencia de otras serpientes de cascabel de la Península de Baja California, *C. enyo* suele ser un depredador activo y no se queda inmóvil esperando a sus presas (Grismer, 2002). Carbajal *et al.* (2016) mencionan que la dieta de *C. enyo*

en la región del Cabo consiste principalmente de roedores (83.34%) y lagartijas (16.66%), y sugieren que pudiera ser un depredador especialista en la zona.

2.3.7 Reproducción

Existe poca literatura acerca de la biología reproductiva de *Crotalus enyo*. Es una especie ovovivípara y se ha reportado que pueden poner de 1 a 10 huevos. Estos eclosionan principalmente en el otoño, aunque también pueden ocurrir nacimientos en la primavera (Grismer, 2002; Goldberg y Beaman, 2003). Grismer (2002) reporta observaciones de recién nacidos desde principios de agosto hasta mediados de octubre, lo que sugiere que el apareamiento generalmente tiene lugar en la primavera y los nacimientos a finales del verano y principios del otoño.

2.3.8 Estado de conservación

Crotalus enyo se encuentra bajo la categoría de Amenazada (A) en la Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2019. Las especies amenazadas podrían encontrarse en peligro de desaparecer a corto o mediano plazo; esto en un escenario en el cual siguen operando los factores que afectan negativamente a la población, tales como el deterioro y la fragmentación del hábitat (SEMARNAT, 2019).

En la Lista Roja de Especies Amenazadas de la UICN, *Crotalus enyo* se encuentra bajo la categoría de Preocupación Menor (LC), la cual se adjudica a especies abundantes y de amplia distribución (Hollingsworth y Frost, 2007; IUCN, 2020). Hollingsworth y Frost (2007) mencionan que, en vista de que *C. enyo* tiene una distribución relativamente amplia, se ‘presume’ una población grande, la cual tiene poca probabilidad de que disminuya a una tasa acelerada como para proponer su inclusión en una categoría de mayor riesgo. También, indican que las actividades agrícolas son la mayor amenaza para la conservación de la especie.

Wilson *et al.* (2013) evaluaron el estado de conservación de los reptiles mexicanos utilizando el Índice de Vulnerabilidad Ambiental, en donde *C. enyo* se encuentra en una categoría de

vulnerabilidad media a la degradación ambiental. Así mismo, Johnson *et al.* (2017) reevaluaron el estado de conservación de los reptiles mexicanos, específicamente de las especies endémicas, en donde mantienen a *C. enyo* como una especie con vulnerabilidad media a la degradación ambiental, ya que se distribuye en una sola región fisiográfica (Península de Baja California).

2.4 Métodos de evaluación del riesgo de extinción de especies

2.4.1 Método de evaluación de riesgo de extinción de las especies silvestres en México (MER)

La Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010 es un instrumento jurídico-administrativo, el cual posiciona a las especies silvestres de México en diferentes categorías de acuerdo a su riesgo de extinción (SEMARNAT, 2019). Desde su primera edición, la NOM-059-2010 se ha utilizado como referencia para evaluar el estado de conservación de las especies de México, así mismo, para el desarrollo y aplicación de las políticas de conservación (García *et al.*, 2017). Las diferentes categorías que maneja la norma son: 1) Sujeta a protección especial (Pr), 2) Amenazada (A), 3) En riesgo de extinción (P) y 4) Probablemente extinta en medio silvestre (E). La NOM-059-2010 determina cómo evaluar el riesgo de extinción mediante el uso de una herramienta, el Método de Evaluación de Riesgo de Extinción de las Especies Silvestres en México (MER); (Sánchez *et al.*, 2007; SEMARNAT, 2019).

El MER es una herramienta cuya finalidad es analizar, mediante una escala numérica jerárquica, los factores que perjudican a las especies silvestres del país. Con base en el resultado que se obtenga del análisis, una especie puede ser identificada en una de las dos categorías de riesgo de extinción de la NOM-059-2010, ya sea En peligro de extinción, o Amenazada; también se puede proponer la inclusión de una especie a la norma como Sujeta a protección especial (Sánchez *et al.*, 2007).

El MER emplea cuatro criterios (catalogados como A, B, C y D), de los cuales se realiza una suma, de modo que, al obtener un resultado, éste tenga relación directa con el grado acumulativo de riesgo de extinción del taxón analizado (Sánchez *et al.*, 2007). El criterio A trata de la amplitud de la distribución del taxón en México; esto refiere al tamaño relativo del ámbito de distribución

natural actual de la especie en el país. El criterio B analiza el estado actual del hábitat con respecto al desarrollo natural del taxón y qué papel juega el hábitat en la tendencia hacia la extinción de la especie que se analiza. El criterio C examina los factores que están relacionados con la historia de vida del taxón que lo hacen vulnerable; dicho brevemente, la vulnerabilidad biológica intrínseca de la especie. Por último, el criterio D determina el impacto que tiene la actividad humana sobre el taxón mediante una estimación numérica de la magnitud del factor antropogénico (Sánchez *et al.*, 2007).

Sánchez *et al.* (2007) mencionan que una vez que se aplican los criterios del MER y se han sumado los puntajes, el MER asigna los siguientes rangos: 1) la especie cuya suma total se encuentre en el rango de 12-14 puntos, será considerada bajo la categoría En peligro de extinción (P) y 2) la especie cuya suma total se situó en el rango de 10-11 puntos, será considerada bajo la categoría de Amenazada (A).

2.4.2 Índice de vulnerabilidad ambiental (EVS)

El Índice de Vulnerabilidad Ambiental (EVS, por sus siglas en inglés) es una herramienta que calcula la susceptibilidad de una especie a futuras amenazas ambientales (Wilson *et al.*, 2013). Fue diseñada para poder utilizarse en casos donde los detalles del estado poblacional no están disponibles. Por lo tanto, el EVS generalmente se puede calcular tan pronto como se describe una especie, debido a que la información que requiere ya se encuentra disponible cuando se ha descrito la especie. Otra de las ventajas principales del EVS es que no necesita estrictamente de las evaluaciones poblacionales de la especie, las cuales regularmente son costosas y requieren de mucho tiempo (Wilson *et al.*, 2013). La versión del algoritmo EVS que desarrollaron Wilson *et al.* (2013) para su uso en México consta de tres escalas: 1) distribución geográfica, 2) distribución ecológica y 3) grado de persecución humana. La puntuación para cada uno de estos tres componentes se suma para obtener el puntaje de vulnerabilidad ambiental y así, asignar a la especie analizada en alguna de las categorías de vulnerabilidad a la degradación ambiental, de la siguiente manera: bajo (3–9), medio (10-13) y alto (14-20; Wilson *et al.*, 2013).

En México, se han llevado a cabo diversos estudios en los cuales se ha evaluado el estado de conservación de los reptiles utilizando como herramienta principal el EVS de Wilson *et al.* (2013). Estos estudios se han realizado en Chiapas (Johnson *et al.*, 2015), Oaxaca (Mata *et al.*, 2015), Nayarit (Woolrich *et al.*, 2016), Aguascalientes (Carbajal y Quintero, 2016), Tamaulipas (Terán *et al.*, 2016), Nuevo León (Nevárez *et al.*, 2016), Puebla (Woolrich *et al.*, 2017), Jalisco (Cruz *et al.*, 2017) y en la Península de Yucatán (González *et al.*, 2017). El EVS también se ha utilizado para evaluar el estado de conservación de los reptiles endémicos de México (Johnson *et al.*, 2017).

2.5 Rareza de especies

La rareza de las especies ha sido una característica poco estudiada debido a que es complicado determinar una explicación general de la rareza para todas las especies, y parece ser que cada especie tiene sus propias particularidades para ser 'poco común' (Pianka, 2014). Rabinowitz (1981) planteó un esquema que funciona como base para cualquier estudio de rareza y es utilizado con frecuencia en la priorización de la conservación de las especies. Elaboró un patrón general de abundancia de especies, en el que existen siete formas diferentes en el que las especies pueden ser catalogadas como raras. Cualquier especie puede dividirse en dos categorías (rara o común) atendiendo a cada uno de estos tres criterios: 1) extensión geográfica amplia o estrecha, 2) especificidad del hábitat elevada o restringida y 3) abundancia local elevada o reducida. De acuerdo con Rabinowitz (1981), sólo una de las ocho combinaciones posibles (abundancia local elevada, extensión geográfica amplia y especificidad del hábitat elevada) determina a una especie común. Las otras siete combinaciones pertenecen a distintas formas de rareza. Las especies con una distribución geográfica estrecha y una especificidad de hábitat estrecha, suelen ser el ejemplo clásico de rareza de especies endémicas muy restringidas, las cuales a menudo están en peligro o amenazadas (Rabinowitz, 1981).

Birskis *et al.* (2019) analizaron como se distribuye la rareza de 143 especies de crotalinos en el continente americano e investigaron cuales son los factores que predicen los patrones de rareza en el grupo. Birskis *et al.* (2019) mencionan que la latitud es un factor importante que predice la rareza en las serpientes crotalinas, más no el tamaño corporal como se habían planteado en su

hipótesis. Las especies de este grupo tienden a ser localmente comunes, pero con una amplitud del hábitat estrecha (Birskis *et al.*, 2019), con base en el esquema de Rabinowitz (1981).

2.6 Modelación de nicho ecológico

El nicho ecológico se puede definir como el conjunto de condiciones (factores abióticos) bajo las cuales una especie puede mantener poblaciones viables sin inmigración (Grinnell, 1924). Los modelos de nicho ecológico emplean diversas herramientas de análisis de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para relacionar la distribución geográfica de una especie (variable dependiente) con una serie de variables ambientales (variables independientes) que son esenciales al determinar la distribución de la especie (Halama *et al.*, 2008). Dichos modelos enfatizan los parámetros del nicho ecológico de una especie y generan hipótesis comprobables sobre el conjunto de factores ambientales que definen y limitan la distribución de la especie dentro de un área determinada. Estos modelos también identifican la ubicación del hábitat potencial adecuado (Halama *et al.*, 2008).

La modelación de nicho ecológico tiene dos objetivos principales: 1) comprender el papel que juega la variación de los factores bióticos y abióticos en la definición y limitación de la distribución geográfica de una especie a escala de paisaje, e 2) identificar el hábitat potencialmente adecuado para la especie (Halama *et al.*, 2008). Estos modelos ayudan a determinar el estado de conservación sobre todo de especies cuya recopilación de datos ecológicos, demográficos, etológicos y genéticos precisos es difícil y de las cuales se tienen pocos registros de presencia (Santos *et al.*, 2006; Papes y Gaubert, 2007), como en el caso de *Crotalus enyo*.

Los modelos de nicho ecológico se pueden realizar con datos de presencia y ausencia, pero estos últimos están raramente disponibles y a veces su uso en los modelos es cuestionable (Anderson *et al.*, 2003; Phillips *et al.*, 2006). Por lo tanto, los modelos basados solo en registros de presencia tienen mayor peso al determinar la distribución potencial de las especies. Esta clase de modelos representan una aproximación del nicho ecológico en los espacios ambientales analizados (Phillips *et al.*, 2006).

El nicho *fundamental* de una especie se define como el conjunto de condiciones que le permiten sobrevivir a largo plazo, mientras que el nicho *realizado* es el conjunto de condiciones del nicho *fundamental* que en realidad ocupa la especie (Soberón y Townsend, 2005; Soberón y Nakamura, 2009). Esto se debe a que existen factores que pueden evitar que la especie habite en las condiciones donde puede alcanzar todo su potencial ecológico, tales como las interacciones bióticas con otras especies, las barreras geográficas que impidan su dispersión a otras áreas o la actividad humana (Phillips *et al.*, 2006). Por lo tanto, los modelos basados en nichos son una aproximación del nicho *realizado* de la especie. Siempre que el modelo abarque con precisión el nicho *fundamental* de la especie, la proyección del modelo en el área de estudio representará la distribución potencial de la especie (Phillips *et al.*, 2006).

Una de las herramientas más utilizadas para la modelación de nicho ecológico es el software de MaxEnt. El propósito de MaxEnt es estimar el área de distribución geográfica de una especie al encontrar la distribución con la ‘máxima entropía’ (es decir, la más extendida o cercana a la uniforme geográficamente) sujeta a restricciones, las cuales derivan de las condiciones ambientales en las localidades de presencia donde se ha registrado la especie. Dichas restricciones se representan como un conjunto de variables, denominadas “características”, y requieren que la media de cada característica coincida con la media de la muestra (Phillips *et al.*, 2004; Phillips *et al.*, 2006; Phillips *et al.*, 2017).

Estrada-Hernández (2010) determinó el área de distribución geográfica y ecológica potencial de *Crotalus enyo* e identificó que el rango anual de temperatura, la estacionalidad de la temperatura y la precipitación del trimestre más seco, son las variables ambientales que mayor influyen en la presencia de la serpiente. Así mismo, Estrada-Hernández (2010) menciona que *C. enyo* prefiere climas moderadamente desérticos y evita los que son muy cálidos-secos, así como los muy fríos-húmedos.

3. JUSTIFICACIÓN

En la Península de Baja California son escasos los estudios en los cuales se ha evaluado el estado de conservación de los reptiles (Grismer, 2002; Lovich *et al.*, 2009) y aún falta información por conocer acerca de su herpetofauna. El riesgo de extinción de ciertos taxones, particularmente para las serpientes, puede ser subestimado debido a la falta de información sobre sus poblaciones (Böhm *et al.*, 2013). Por lo tanto, las investigaciones que aporten información básica sobre la biología, estado poblacional, distribución potencial y rareza de las especies, resultan críticas para proponer medidas eficaces de conservación (Sánchez *et al.*, 2007; Halama *et al.*, 2008; Estrada-Hernández, 2010; Birskis *et al.*, 2019).

Existe poca información respecto a la conservación de *Crotalus enyo*; las últimas evaluaciones han confirmado que su abundancia poblacional es difícil de calcular debido a sus hábitos (Grismer, 2002; Hollingsworth y Frost, 2007; Arnaud, 2015), y que su estado de conservación necesita actualizarse. El presente trabajo busca determinar el estado de conservación actual de *C. enyo*, lo que nos permitirá desarrollar estrategias para la conservación de la especie.

4. HIPÓTESIS

Dado que la serpiente de cascabel de Baja California (*Crotalus enyo*) es una especie con distribución geográfica restringida (endémica), rara y poco abundante, se espera que:

- i. De acuerdo al MER, se mantenga como una especie Amenazada (A), y
- ii. De acuerdo al EVS, se catalogue como una especie con alta vulnerabilidad a la degradación ambiental.

5. OBJETIVOS

5.1 Objetivo general

Determinar el estado de conservación de la serpiente de cascabel de Baja California (*Crotalus enyo*) en la Península de Baja California.

5.2 Objetivos particulares

- Modelar el nicho ecológico de *C. enyo*.
- Evaluar el estado de conservación de *C. enyo* mediante el Método de Evaluación de Riesgo de Extinción de las Especies Silvestres en México (MER).
- Evaluar el estado de conservación de *C. enyo* mediante el Índice de Vulnerabilidad Ambiental (EVS).
- Determinar la categoría de rareza de *C. enyo*.

6. MATERIAL Y MÉTODOS

6.1. Área de estudio

La Península de Baja California (PBC) constituye una franja de tierra localizada en la región noroeste de México, desde la frontera con Estados Unidos hasta una latitud de 22°30' N (Fig. 3). Es la segunda península de mayor extensión en el mundo, con una longitud aproximada de 1,300 km y una anchura media estimada de 140 km. Se encuentra rodeada por el Océano Pacífico, separada del continente por el Golfo de California (Maderey, 1975; INEGI, 1995, 2001). Está atravesada del noroeste al sureste por un sistema montañoso integrado por varias sierras, las cuales son: Sierras de Juárez, San Pedro Mártir, Los Padres, San Borja, Santa Lucía, Palmas, San Francisco, La Giganta, San Lorenzo y La Laguna. Las cumbres de mayor altitud se encuentran en el norte de la península, en la Sierra San Pedro Mártir; el pico más alto es el Cerro La Encantada con 3,078 msnm (Maderey, 1975; INEGI, 2001). Como área de estudio también se consideran las 65 islas aledañas a la península, en las cuales ya se han reportado registros de *Crotalus enyo*.

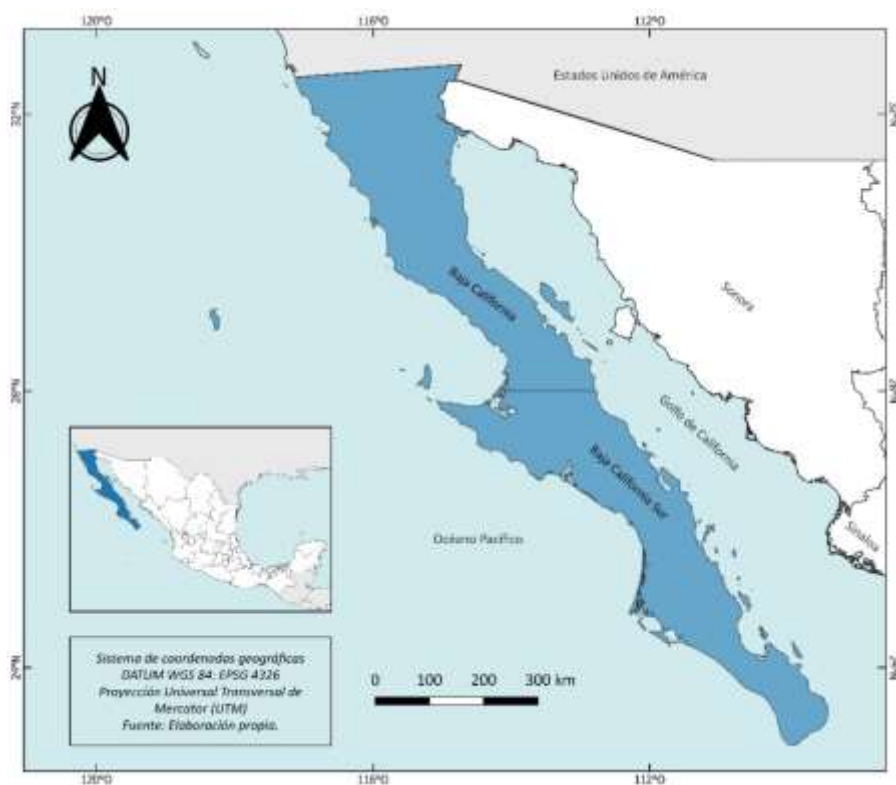


Figura 3. Ubicación del área de estudio.

De acuerdo con la clasificación climática de Köppen, se presentan 20 diferentes tipos de climas, los cuales son templados, muy secos, semicálidos y cálidos. No obstante, en la porción noroccidental de las Sierras de Juárez y San Pedro Mártir, el clima seco templado varía a semifrío subhúmedo en las partes más altas (García, 1998a; INEGI, 1995, 2001). Se registra una temperatura media anual de 18°C y una precipitación media anual de 200 mm. Las mayores precipitaciones, que van de 500-700 mm, se presentan en las partes altas de la Sierra San Pedro Mártir en Baja California y en la Sierra La Laguna en Baja California Sur (Maderey, 1975; García, 1998b). Desde la frontera internacional hasta Bahía Magdalena se encuentra una franja de norte a sur con régimen de lluvias en invierno, mientras que en el resto de la península las lluvias se presentan durante el verano y otoño (INEGI, 1995, 2001).

La península presenta una gran diversidad de formaciones vegetales, siendo el matorral xerófilo el tipo de vegetación de mayor cobertura, que predomina principalmente en las partes bajas. Otros tipos de vegetación en la región son el bosque tropical caducifolio, vegetación de desiertos áridos arenosos, vegetación halófila, chaparral costero, y los bosques de coníferas (*Pinus* y *Quercus*) que se ubican por encima de los 1,000 msnm (Miranda y Hernández, 1963; Rzedowski, 2006). Algunas especies de plantas características de la región son el cirio *Fouquieria columnaris*, el cardón *Pachycereus pringlei*, los copales *Bursera sp.* y las choyas *Cylindropuntia sp.* (Rebman y Roberts, 2012).

En la península se presentan 14 ecorregiones, con características particulares en cuanto a su clima, vegetación y topografía (González *et al.*, 2010) (Fig. 4).

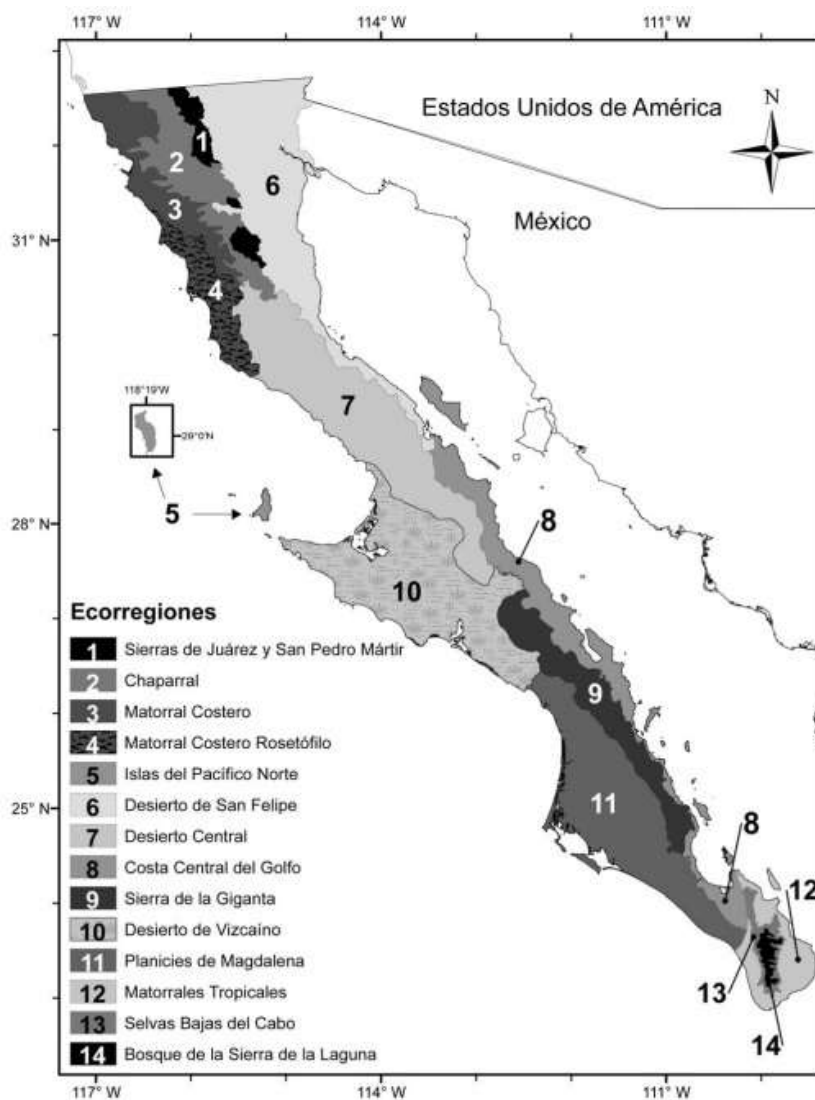


Figura 4. Ecorregiones de la Península de Baja California. Fuente: González *et al.*, 2010.

6.2 Modelación de nicho ecológico

6.2.1 Localidades de colecta

Para la construcción del modelo de nicho ecológico, se elaboró una base de datos con los registros de presencia de *Crotalus enyo*. Para la obtención de dichos registros, se revisaron las bases de datos de museos y colecciones científicas nacionales e internacionales; en línea se consultaron los portales del Global Biodiversity Information Facility (GBIF) (www.gbif.org) y HerpNet (www.herpnet.org). Particularmente se consultaron las bases de datos de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC), la Universidad Autónoma de Baja California Sur (UABCS), el Museo de Historia Natural de San Diego (SDNHM), el Centro de Investigaciones

Biológicas del Noroeste (CIBNOR) y bases de datos particulares de investigadores del CIBNOR. También, se consultaron en línea los registros de *C. enyo* en la página de Naturalista (www.naturalista.mx), los cuales fueron verificados previamente (consulta de imágenes y localidades).

Después, se realizó la depuración de los registros de colecta. Los registros que no estaban georreferenciados ni tenían información sobre la localidad, fueron eliminados. También se eliminaron registros repetitivos de la misma localidad y/o con las mismas coordenadas geográficas. Se eliminaron los registros que no tenían fecha de colecta debido a que, para el presente trabajo, fue importante la obtención de registros recientes. Se utilizaron registros recientes (2000-2020) y algunos históricos que datan de antes del 2000, los cuales se verificaron en un sistema de información geográfica (SIG) para determinar que se había producido poco o ningún cambio de suelo en el sitio. Posteriormente, se georreferenciaron los registros que tenían información de la localidad de colecta, esto mediante los portales de GeoNames (www.geonames.org), FallinGrain (www.fallingrain.com) y el programa de Google Earth Pro.

La base de datos de los registros de presencia se importó en el SIG QGIS, versión 3.16 (Equipo de desarrollo de QGIS, 2020), en el cual se convirtieron todas las localidades de colecta a un sistema de coordenadas común, World Geodetic System 84 (WGS 84). Para reducir cualquier sesgo espacial de los datos, si dos registros estaban dentro de una zona de influencia de 200 m, uno de los registros se eliminó al azar. Por último, cuando se obtuvo la base de datos depurada, se obtuvo el valor de cada una de las variables ambientales utilizadas en el modelo para todas las localidades de colecta.

6.2.2 Variables ambientales

Para la construcción del modelo se utilizaron 19 variables bioclimáticas correspondientes a la precipitación y temperatura de la PBC, así como dos variables topográficas, las cuales se obtuvieron de la base de datos de WorldClim (www.worldclim.org). WorldClim es una base de datos que proporciona capas climáticas y meteorológicas de alta resolución espacial (WorldClim, 2020). También se utilizaron dos variables categóricas, una de edafología y otra de

vegetación y uso de suelo (Tabla 1), las cuales se obtuvieron de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) (www.conabio.gob.mx/informacion/gis).

Las variables categóricas fueron obtenidas en formato *shape* (.shp) y se ingresaron al programa QGIS 3.16 para convertirlas en archivos raster formato ASCII Grid (.asc), debido a que los archivos con formato *shape* no son compatibles para la construcción de los modelos. Todas las capas utilizadas para el modelo tienen una resolución espacial de 30 segundos (es decir, ~1 km²), con un tamaño de celda de 0.00833 x 0.00833 grados decimales.

Tabla 1. Variables utilizadas para la construcción de los modelos de nicho.

Clave	Descripción	Tipo
Bio1	Temperatura media anual	
Bio2	Rango diurno medio (Media mensual (temp. máx. - temp. mín.))	
Bio3	Isotermalidad (Bio2/Bio7) * 100	
Bio4	Estacionalidad de la temperatura (Desv. est. * 100)	
Bio5	Temperatura máxima del mes más cálido	
Bio6	Temperatura mínima del mes más frío	
Bio7	Rango anual de temperatura (Bio5-Bio6)	
Bio8	Temperatura media del trimestre más húmedo	
Bio9	Temperatura media del cuatrimestre más seco	
Bio10	Temperatura media del trimestre más cálido	
Bio11	Temperatura media del cuatrimestre más frío	Continuas
Bio12	Precipitación anual	
Bio13	Precipitación del mes más húmedo	
Bio14	Precipitación del mes más seco	
Bio15	Estacionalidad de la precipitación (Coeficiente de variación)	
Bio16	Precipitación del cuatrimestre más húmedo	
Bio17	Precipitación del cuatrimestre más seco	
Bio18	Precipitación del trimestre más cálido	
Bio19	Precipitación del cuatrimestre más frío	
ELEVA	Elevación del terreno	
PENDI	Pendiente del terreno	
EDAFO	Edafología (tipo de suelo, textura, fase física, fase química)	Categóricas
USVEG	Tipo de vegetación y uso de suelo	

6.2.3 Construcción y evaluación de los modelos

Para la construcción de los modelos de nicho se empleó el algoritmo de máxima entropía del software MaxEnt ver. 3.4.1 (Phillips *et al.*, 2020). Al software se ingresaron las localidades de colecta de la base de datos depurada junto con las variables ambientales seleccionadas anteriormente. Se construyeron dos modelos, en los cuales se varió el tipo de variables climáticas utilizadas; en un modelo se ingresaron sólo las variables continuas y en el segundo modelo se ingresaron todas las variables (continuas y categóricas). Para cada modelo, se realizaron 10 réplicas utilizando la *validación cruzada* como método de remuestreo, con un máximo de 500 iteraciones y un umbral de convergencia de 10^{-5} iteraciones. Se utilizaron 22 localidades colectadas independientemente para probar los modelos (*test data*), las cuales se seleccionan por default al utilizar el método de remuestreo de *validación cruzada*, y se fijó el multiplicador de regularización en 1 para obtener un modelo más ajustado.

Para la evaluación de los modelos, se utilizó el valor del área bajo la curva (AUC, por sus siglas en inglés) característica operativa del receptor (ROC) (Fielding y Bell, 1997). La curva ROC es un método alternativo para evaluar la precisión de los modelos de nicho ecológico y utiliza todos los umbrales posibles para clasificar los valores en matrices, de tal manera que obtiene la sensibilidad y especificidad para cada matriz. Posteriormente, calcula la relación entre la sensibilidad contra la especificidad y obtiene los valores AUC, los cuales varían entre 0 a 1, siendo los valores cercanos a 1 los óptimos para determinar cuál es el mejor modelo. Se ha demostrado que el valor AUC es independiente de la prevalencia, por lo que se considera como una medida precisa para evaluar el rendimiento de los modelos (Liu *et al.*, 2001; Manel *et al.*, 2002; Somodi *et al.*, 2017; Shabani *et al.*, 2018).

Los modelos fueron evaluados con base en su valor promedio del área bajo la curva (AUC), en el valor AUC de la muestra de las localidades de prueba (*test data*), en el valor de ganancia (*GAIN*) y en la desviación estándar del valor AUC. También se realizó un análisis visual de los mapas obtenidos.

6.2.4 Construcción del modelo final

Posterior a la evaluación de los modelos, se construyó el modelo final utilizando las 234 localidades de colecta, de las cuales 22 son localidades de prueba independientes (*test*). Se seleccionaron todas las variables ambientales, de las cuales 21 son continuas y dos categóricas (Tabla 1). Se empleó la *validación cruzada* como método de remuestreo y se fijó el multiplicador de regularización en 1 para un mayor ajuste del modelo. Finalmente, el mapa de distribución potencial se ingresó al programa QGIS ver. 3.16 para su edición y mejora visual.

6.3 Evaluación del estado de conservación

6.3.1 Índice de vulnerabilidad ambiental (EVS)

El Índice de Vulnerabilidad Ambiental (EVS) fue desarrollado para su uso con los reptiles mexicanos y consiste en tres escalas (Wilson *et al.*, 2013). La primera escala trata sobre la distribución geográfica de la especie (Tabla 2). Para determinarla, se tomó como referencia la superficie total de la distribución de *C. enyo* en México y se estimó el porcentaje que representa en comparación a la superficie del país. Con base en Grismer (2002), el mapa de distribución de *C. enyo* se digitalizó en el programa QGIS ver. 3.16 para así obtener un polígono. Posteriormente, se calculó la superficie del polígono en la PBC, a la cual se le sumaron las superficies de las islas en las cuales se distribuye *C. enyo* (Murphy *et al.*, 2002b; Aguirre *et al.*, 2010) y se eliminó el polígono correspondiente a la Sierra la Laguna, dado que en esta área no se distribuye la especie (Estrada-Hernández, 2010).

Tabla 2. Primera escala del Índice de Vulnerabilidad Ambiental (EVS).

Tipo de distribución geográfica	Valor
Amplia tanto dentro como fuera de México.	1
Amplia dentro de México, pero limitada fuera de México.	2
Limitada dentro de México, pero prevalente fuera de México.	3
Limitada dentro y fuera de México.	4
Sólo dentro de México, pero no limitada a las cercanías de la localidad tipo*.	5
Limitada a México, en las cercanías de la localidad tipo.	6

Notas: *Lugar de donde proviene el ejemplar con el cual se realizó la descripción científica de la especie.

La segunda escala trata de la distribución ecológica de la especie, basada en la cantidad de formaciones vegetales ocupadas (Wilson *et al.*, 2013). En el presente estudio, se analizaron las ecorregiones ocupadas por la especie (Tabla 3), con base en el mapa de González *et al.* (2010) de las ecorregiones de la PBC. Se ingresaron al programa QGIS ver. 3.16 la base de datos de las localidades de colecta de *C. enyo* y el mapa de las ecorregiones de la PBC para determinar en cuántas ecorregiones se distribuye. Posteriormente, se realizó la edición del mapa para añadir elementos geográficos.

Tabla 3. Segunda escala del Índice de Vulnerabilidad Ambiental (EVS).

Número de ecorregiones ocupadas	Valor
≥8	1
7	2
6	3
5	4
4	5
3	6
2	7
1	8

La tercera escala se relaciona con el grado de persecución humana hacia la especie (Tabla 4). Para determinar esto, se revisó literatura sobre la historia natural de *C. enyo* y en general de las serpientes de cascabel (*Crotalus*).

Tabla 4. Tercera escala del Índice de Vulnerabilidad Ambiental (EVS).

Grado de persecución humana	Valor
Especie fosorial*, usualmente escapa de la vista humana.	1
Semifosorial, arbórea o acuática nocturna. No venenosa y generalmente no imita a especies venenosas. A veces escapan de la vista humana.	2
Terrestre y/o arbórea o acuática, generalmente ignorada por los humanos.	3
Terrestre y/o arbórea o acuática. Se cree que son especies peligrosas y pueden ser sacrificadas si son vistas por los humanos.	4
Especies venenosas o imitaciones de las mismas, sacrificadas si son vistas.	5
Especies explotadas comercialmente o no para pieles, carne, huevos y/o el comercio de mascotas.	6

Notas: *Especies que construyen y viven en cuevas subterráneas.

Una vez sumados los valores asignados a *C. enyo* en cada escala, se obtuvo la puntuación de vulnerabilidad ambiental, la cual puede variar 3 a 20. Para determinar el estado de conservación de *C. enyo*, se consideraron tres categorías de vulnerabilidad a la degradación ambiental: baja (3-9), media (10-13) y alta (14-20) (Wilson *et al.*, 2013).

6.3.2 Método de evaluación de riesgo de extinción de las especies silvestres en México (MER)

La segunda herramienta que se utilizó para evaluar el estado de conservación de *C. enyo* es el Método de Evaluación de Riesgo de Extinción de las Especies Silvestres en México (MER). El MER utiliza cuatro criterios, a los cuales se les designa una escala de tres a cuatro valores que indican el riesgo de extinción (Sánchez *et al.*, 2007).

La suma acumulativa del puntaje de los criterios tiene una relación directa con el grado acumulativo del riesgo de extinción (Sánchez *et al.*, 2007). Los criterios que se consideraron se especifican en la Tabla 5.

Tabla 5. Criterios del Método de Evaluación de Riesgo de Extinción de las Especies (MER).

Criterios	Valor
A. Amplitud de la distribución del taxón en México:	
i) Muy restringida	4
ii) Restringida	3
iii) Medianamente restringida o amplia	2
iv) Ampliamente distribuida o muy amplia	1
B. Estado del hábitat con respecto al desarrollo natural del taxón:	
i) Hostil o muy limitante	3
ii) Intermedio o limitante	2
iii) Propicio o poco limitante	1
C. Vulnerabilidad biológica intrínseca del taxón:	
i) Vulnerabilidad alta	3
ii) Vulnerabilidad media	2
iii) Vulnerabilidad baja	1
D. Impacto de la actividad humana sobre el taxón:	
i) Alto impacto	4
ii) Impacto medio	3
iii) Bajo impacto	2

Para analizar la amplitud de la distribución de *C. enyo* en México, se estimó la superficie de su distribución de acuerdo con el mapa de Grismer (2002). Tomando en cuenta las referencias geográficas de latitud y longitud, dicho mapa fue digitalizado para así obtener un polígono. Utilizando el programa QGIS ver. 3.16, se estimó la superficie del polígono en la PBC a la cual se le sumaron las superficies de las islas en las cuales se distribuye *C. enyo* (Murphy *et al.*, 2002b; Aguirre *et al.*, 2010) y se le restó la superficie correspondiente al polígono de la Sierra La Laguna, dado que en esta área no se distribuye la especie (Estrada-Hernández, 2010). Luego, se calculó el porcentaje que representa la superficie total de la distribución de *C. enyo* en comparación a la superficie del país.

Posteriormente, se hizo una revisión bibliográfica de la historia natural de *C. enyo* para determinar el valor de los criterios B, C y D, en donde se recopiló información sobre su distribución, preferencias de hábitat, patrón de actividad, comportamiento, dieta, reproducción y abundancia poblacional. Para análisis del criterio B, también se utilizaron los resultados obtenidos en la segunda escala del EVS (distribución ecológica).

Una vez que se aplicaron los criterios del MER, se procedió a realizar la suma del puntaje obtenido en cada criterio. Se determinó el riesgo de extinción de *C. enyo* con base en los intervalos ya establecidos por Sánchez *et al.* (2007) para la asignación de la categoría de riesgo; si se obtiene un total de 10 u 11 puntos la especie se cataloga como Amenazada (A) y si se encuentra en el rango de 12 a 14, la especie se considera En Peligro de Extinción (P).

6.4 Análisis de rareza

Para determinar la rareza de *Crotalus enyo*, se utilizó la metodología de Rabinowitz (1981). El esquema de Rabinowitz (1981) es una tabla de ocho combinaciones de acuerdo con tres variables: 1) extensión geográfica, 2) especificidad del hábitat y 3) tamaño de la población o abundancia local (Tabla 6). Sólo una de las ocho combinaciones posibles (abundancia local elevada, extensión geográfica amplia y especificidad del hábitat elevada) se categoriza como común, mientras que las otras siete combinaciones se catalogan como distintas formas de

rareza de las especies (Rabinowitz, 1981). Las distintas combinaciones se clasifican en cuatro categorías (Rabinowitz, 1981; Birskis *et al.*, 2019) detalladas en la Tabla 7.

Tabla 6. Tipología de especies raras.

DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA	Grande		Pequeña	
	Amplio	Estrecho	Amplio	Estrecho
ESPECIFICIDAD DEL HÁBITAT				
ABUNDANCIA LOCAL	Localmente abundante en un amplio rango de distribución y en diversos hábitats.	Localmente abundante en un amplio rango de distribución, en un hábitat específico.	Localmente abundante en diversos hábitats, pero restringido geográficamente.	Localmente abundante en un hábitat específico pero restringido geográficamente.
Pequeño, no dominante	Constantemente escaso, en un amplio rango de distribución y en diversos hábitats.	Constantemente escaso en un hábitat específico, pero en un amplio rango de distribución.	Constantemente escaso y restringido geográficamente en diversos hábitats.	Constantemente escaso y restringido geográficamente en un hábitat específico.

Tabla 7. Categorías de rareza.

Categorías de rareza	Descripción
No Rara (NR)	La especie no es rara en ninguna de las variables.
Baja Intermedia (BI)	La especie es rara en una de las variables.
Alta Intermedia (AI)	La especie es rara en dos variables.
Muy Rara (MR)	La especie es rara en las tres variables.

Para determinar la extensión de la distribución geográfica de *C. enyo*, se calculó el porcentaje de superficie que ocupa la especie en comparación con la superficie del territorio nacional. En el programa QGIS ver. 3.16, se digitalizó el mapa de distribución de *C. enyo* (Grismer, 2002) para así obtener un polígono y estimar su superficie. Si el porcentaje de la superficie es menor al 50% del territorio nacional, se considera que la distribución es reducida y, si es mayor, se considera que es amplia (Birskis *et al.*, 2019).

Para estimar la especificidad del hábitat de la especie, se revisó literatura sobre el uso de hábitat de *C. enyo* (Grismer, 2002; Carbajal-Márquez, 2013) y se determinaron los principales hábitats en los que se encuentra. Si se encuentra en más de un tipo de hábitat, se considera que la especificidad de hábitat es amplia, y si se encuentra sólo en un tipo de hábitat, se considera que es estrecha (Birskis *et al.*, 2019). También se utilizaron los resultados obtenidos en la segunda escala del EVS (distribución ecológica) para el análisis de esta variable.

Por último, para determinar el tamaño de la población local de *C. enyo* se utilizaron datos proporcionados por Arnaud-Franco (comunicación personal), los cuales se obtuvieron en un periodo de 10 años en 32 localidades de la PBC, en diferentes temporadas del año. La abundancia poblacional relativa se estimó de acuerdo con el número de serpientes encontradas con respecto al esfuerzo de muestreo. Por lo tanto, la abundancia está expresada como la relación del número de serpientes encontradas de acuerdo con las horas de muestreo invertidas por hombre (Arnaud, 2015).

7. RESULTADOS

7.1 Modelado de nicho ecológico

7.1.1 Localidades de colecta

La base de datos de las localidades de colecta de *Crotalus enyo* utilizada tiene un total de 234 localidades de colecta, de las cuales 128 son registros 'históricos' (antes del 2000) y 106 registros recientes (2000-2020). A partir de dicha base, se observó la distribución de las localidades de colecta en las diferentes variables (Tabla 8). Respecto a la temperatura, se observó que el 47.9% de las colectas de *C. enyo* se encuentran en un rango de temperatura media anual de 18 - 26 °C. En cuanto a las temperaturas del mes más frío, sólo el 2.1% se encuentra en temperaturas por debajo de los 5 °C y, respecto a las temperaturas del mes más cálido, el 44.4% se encuentra en temperaturas mayores a los 35 °C. Cabe mencionar que no se registraron localidades de colecta en temperaturas mayores a los 40 °C. Conforme a la precipitación, el 61.5% de las localidades se encuentra en un rango de precipitación anual entre 70-250 mm y el 38.5% se observó en regiones con precipitaciones mayores a los 250 mm.

En cuanto a los tipos de vegetación y uso de suelo, el 29.5% de las localidades de colecta se encontró en el matorral sarcocaule, el 22.2% en el matorral sarco-crasicaule y el 19.6% se encuentra en la selva baja caducifolia. Respecto a los tipos de suelo, el 54.3% de las localidades se registraron en regosol eútrico con textura gruesa, el 13.2% se observó en litosol con textura gruesa y el 9% en yermosol háplico con textura media a gruesa.

Altitudinalmente, el 81.6% de las localidades se encuentra por debajo de los 500 msnm. Cabe mencionar que se registró una localidad a -3 msnm, en la Isla Magdalena y una localidad a 943 m en las zonas aledañas a la Sierra La Laguna.

Tabla 8. Descripción cuantitativa de las variables observadas en las localidades de colecta de *C. enyo*.

Variable	Media	Mínimo	Máximo	Desv. est.
Temperatura media anual (°C)	21.4	16.1	24.3	1.7
Rango de temperatura media diurna (°C)	15.1	9.7	18.2	1.7
Isotermalidad	57.6	42.3	67.7	3.7
Estacionalidad de la temperatura	439.9	270	577.8	54.3
Temperatura máxima del mes más cálido (°C)	34.6	25.5	38.6	2.3
Temperatura mínima del mes más frío (°C)	8.4	4.6	11.3	1.4
Rango anual de temperatura (°C)	26.2	18.3	31.2	2.4
Temperatura media del trimestre más húmedo (°C)	24.1	12.2	31.4	5.9
Temperatura media del cuatrimestre más seco (°C)	21.2	16.6	25.8	1.9
Temperatura media del trimestre más cálido (°C)	27	19.9	31.4	2
Temperatura media del cuatrimestre más frío (°C)	16.2	12.2	18.6	1.4
Precipitación anual (mm)	233.9	70	571	117
Precipitación del mes más húmedo (mm)	75.8	14	195	49.2
Precipitación del mes más seco (mm)	0.4	0	1	0.5
Estacionalidad de la precipitación	109.2	59.5	141.4	26.4
Precipitación del cuatrimestre más húmedo (mm)	160.2	32	426	97.9
Precipitación del cuatrimestre más seco (mm)	2.5	0	7	1.5
Precipitación del trimestre más cálido (mm)	149.3	9.0	426	107.8
Precipitación del cuatrimestre más frío (mm)	43.7	21	130	16.2
Elevación del terreno (msnm)	267.5	-3	943	211

7.1.2 Variables ambientales

Se determinaron las variables que más contribuyen a predecir la ocurrencia de *C. enyo*. Se observó que la estacionalidad de la precipitación (Bio15), el tipo de vegetación y uso de suelo (USVEG) (Fig. 6) y la precipitación del cuatrimestre más frío (Bio19), fueron las variables más importantes en la predicción del modelo. En el modelo final, el porcentaje de contribución relativa para cada una fue: Bio15 con 45.6%, USVEG con 9.7% y Bio19 con 6.3% (Tabla 9). Se identificó que, a mayor diferencia de precipitación entre estaciones, los valores logísticos de

predicción de presencia de la especie aumentan. También se observó que, si la precipitación aumenta durante los meses más fríos del año, la predicción de ocurrencia de la especie disminuye considerablemente (Fig. 5).

Tabla 9. Porcentaje de la contribución relativa de las variables utilizadas en la modelación de nicho.

Variable	Contribución	Variable	Contribución
Bio15	45.6 %	Bio7	1.2 %
USVEG	9.7 %	Bio10	1.1 %
Bio19	6.3 %	Bio2	1 %
Bio11	6 %	PENDI	0.9 %
Bio4	4.2 %	Bio14	0.9 %
EDAFO	4 %	Bio8	0.8 %
Bio17	3.7 %	Bio9	0.7 %
Bio1	3 %	Bio5	0.7 %
Bio13	2.9 %	Bio16	0.5%
ELEVA	2.2 %	Bio6	0.5 %
Bio3	2 %	Bio12	0.3 %
Bio18	1.6 %		

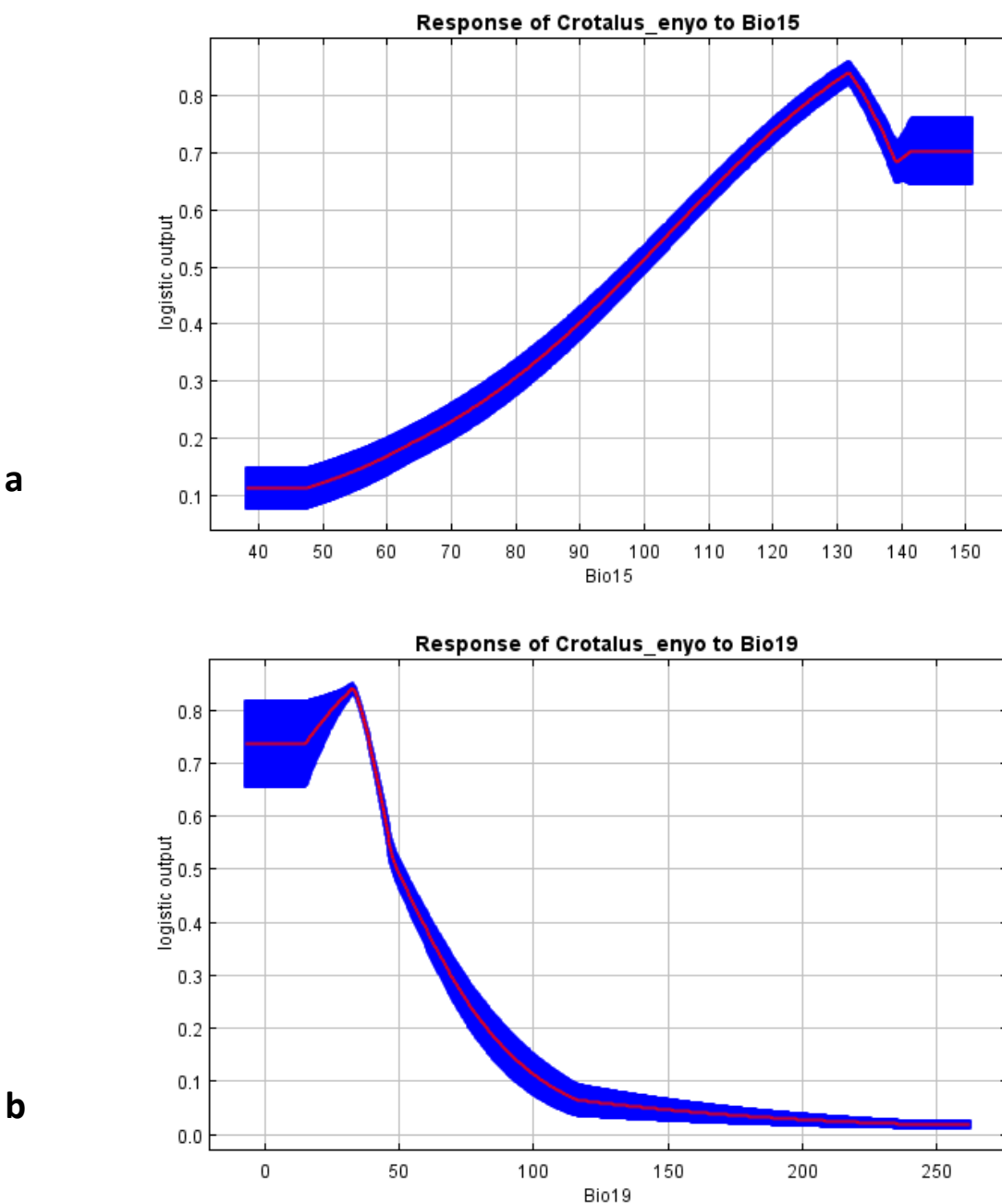


Figura 5. Efecto en la predicción logística de las variables continuas principales que afectan la distribución de *Crotalus enyo* en el modelo. La línea roja indica la media del efecto y el área sombreada en azul su desviación estándar observada a través del remuestreo (validación cruzada). La figura **a)** corresponde a la respuesta de *C. enyo* a la estacionalidad de la precipitación y **b)** a la precipitación del cuatrimestre más frío.

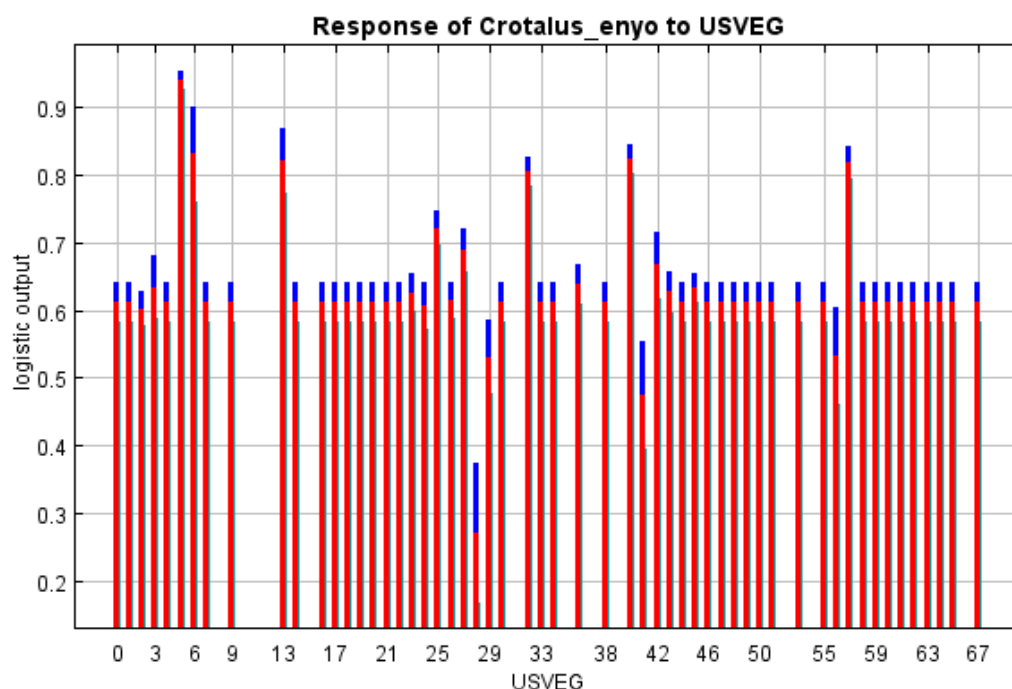


Figura 6. Efecto en la predicción logística de la variable categórica que más afecta la distribución de *Crotalus enyo* en el modelo. Las barras rojas indican la media del efecto y las azules (dos tonos para variables categóricas) su desviación estándar observada a través del remuestreo (validación cruzada). La figura corresponde a la respuesta de *C. enyo* a los tipos de vegetación y uso de suelo. Los números que se observan en el eje de las X corresponden a los códigos asignados a cada uno de los tipos vegetación y uso de suelo.

7.1.3 Construcción y evaluación de los modelos

Se construyeron dos modelos con 234 localidades de colecta, en los cuales se varió el tipo de variables ambientales utilizadas. En el primer modelo se ingresaron sólo las variables continuas y en el segundo modelo se ingresaron todas las variables (continuas y categóricas), esto para determinar la aportación de las variables categóricas al modelo. Para cada modelo, se realizaron 10 réplicas y se fijó el multiplicador de regularización en 1 para obtener modelos más ajustados. Del total de localidades de colecta, 22 se utilizaron como localidades de prueba (*test*) las cuales seleccionó el algoritmo por defecto al utilizar la *validación cruzada* como método de remuestreo.

En cuanto a los valores logísticos de presencia de la especie, no se observaron diferencias significativas en ambos modelos. Sin embargo, el modelo construido con todas las variables

ambientales mostró valores más homogéneos y algunas regiones con pocos registros de colecta, lo que proporciona mayor utilidad al predecir la distribución potencial de *C. enyo*.

Teniendo como base los valores de desempeño del AUC de las diferentes réplicas para cada modelo, se consideró que la réplica 1 del segundo modelo es la más adecuada para la predicción de la distribución potencial de *C. enyo*. En su mayoría, el modelo seleccionado presentó valores de desempeño altos en comparación con las réplicas del primer modelo, así como una desviación estándar baja (Tabla 10).

Tabla 10. Comparación de los indicadores de desempeño de las diferentes réplicas para cada modelo.

Modelos	Réplicas	AUC Modelo	GAIN Test	AUC Test	Desviación estándar AUC	Entropía	Prevalencia
1	<i>Crotalus_ enyo_0</i>	0.8921	1.1008	0.8626	0.0324	8.2	0.1759
	<i>Crotalus_ enyo_1</i>	0.8892	1.1999	0.8956	0.022	8.2112	0.1782
	<i>Crotalus_ enyo_2</i>	0.894	1.1275	0.8713	0.0315	8.2123	0.1781
	<i>Crotalus_ enyo_3</i>	0.8983	0.7036	0.8253	0.0356	8.1505	0.1673
	<i>Crotalus_ enyo_4</i>	0.8969	0.9235	0.8385	0.0374	8.1821	0.1729
	<i>Crotalus_ enyo_5</i>	0.8976	0.9642	0.8498	0.0397	8.1895	0.1742
	<i>Crotalus_ enyo_6</i>	0.897	1.0729	0.8419	0.0418	8.1929	0.175
	<i>Crotalus_ enyo_7</i>	0.8854	1.4979	0.9276	0.0201	8.2557	0.1864
	<i>Crotalus_ enyo_8</i>	0.8912	1.2214	0.8909	0.0289	8.2054	0.1774
	<i>Crotalus_ enyo_9</i>	0.8947	0.9314	0.8586	0.0354	8.1843	0.1734
	<i>Crotalus_ enyo</i> (promedio)	0.8936	1.0743	0.8662	0.0325	8.1984	0.1759
2	<i>Crotalus_ enyo_1</i>	0.9011	1.5602	0.9207	0.0269	8.1632	0.1702
	<i>Crotalus_ enyo_3</i>	0.9001	1.3296	0.8961	0.0278	8.1572	0.1693
	<i>Crotalus_ enyo_4</i>	0.9015	1.3749	0.891	0.0365	8.1474	0.1675
	<i>Crotalus_ enyo_2</i>	0.8995	1.1951	0.8676	0.0355	8.1361	0.165
	<i>Crotalus_ enyo_5</i>	0.9029	1.3383	0.9034	0.031	8.1231	0.1633
	<i>Crotalus_ enyo_9</i>	0.9032	1.2287	0.8756	0.0299	8.1222	0.1629
	<i>Crotalus_ enyo_7</i>	0.9044	1.1462	0.855	0.0376	8.1131	0.1609
	<i>Crotalus_ enyo_0</i>	0.9095	0.573	0.7997	0.0371	8.0769	0.1557
	<i>Crotalus_ enyo_8</i>	0.9034	0.9875	0.8742	0.0247	8.0726	0.1549
	<i>Crotalus_ enyo_6</i>	0.9114	0.3592	0.7703	0.0447	8.0469	0.1504
	<i>Crotalus_ enyo</i> (promedio)	0.9037	1.1093	0.8654	0.0332	8.1159	0.162

7.1.4 Modelo de nicho ecológico

El modelo final de nicho ecológico de *C. enyo* se elaboró utilizando las 234 localidades de colecta, de las cuales 22 son localidades de prueba independientes. Se emplearon las variables ambientales continuas y categóricas, y se optó por no utilizar dos variables continuas (Bio6 y Bio12) dado que su contribución a la predicción de la ocurrencia de *C. enyo* fue <5%. Para este modelo, se utilizó como umbral de ausencia el valor de prevalencia del modelo seleccionado anteriormente y se modificó a $\log = 0.1702$ (Fig. 7).

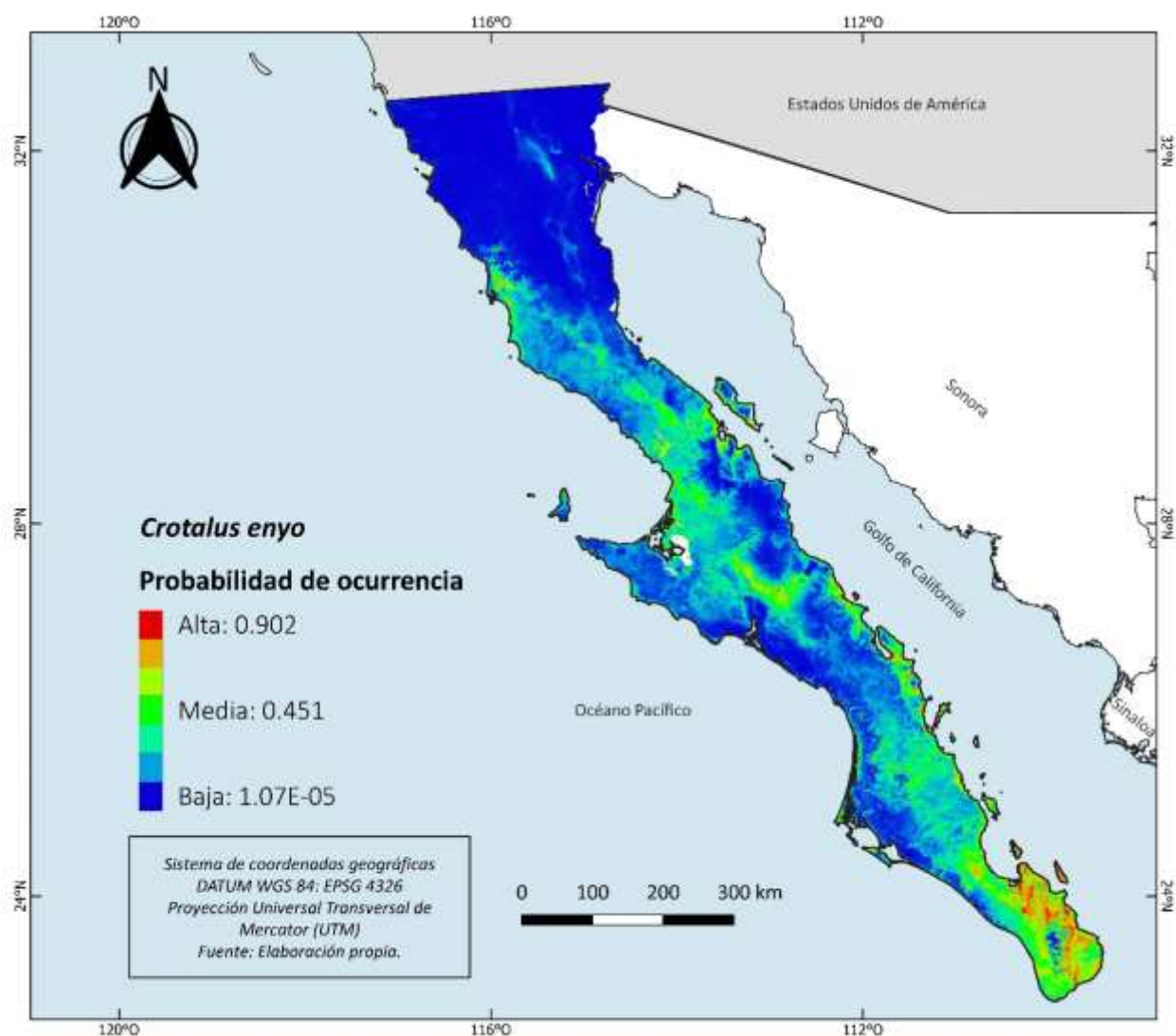


Figura 7. Predicción de la distribución y probabilidad de ocurrencia de *Crotalus enyo*, utilizando el modelo de máxima entropía.

7.2 Evaluación del estado de conservación

7.2.1 Índice de vulnerabilidad ambiental (EVS)

Siguiendo los criterios del EVS, se evaluó el estado de conservación de *Crotalus enyo*:

7.2.1.1 Distribución geográfica

Crotalus enyo es una especie endémica a México (Grismer, 2002), es decir, su distribución geográfica se encuentra limitada dentro del país. Para comprobar lo anterior, se estimó la superficie de distribución de *C. enyo* de acuerdo con el mapa de Grismer (2002). Utilizando un SIG, se calculó la superficie del polígono en la PBC, a la cual se le agregaron las superficies de las islas en las cuales también se distribuye la especie: Magdalena (277 km²) y Santa Margarita (215 km²) del Océano Pacífico; Carmen (143.03 km²), Cerralvo (140.46 km²), Coronados (7.59 km²), Espíritu Santo (87.55 km²), Partida Sur (19.29 km²), San Francisco (4.49 km²), San José (187.16 km²) y San Marcos (30.07 km²) del Golfo de California. Por último, se eliminó el polígono correspondiente a la Sierra La Laguna, debido a que *C. enyo* no está reportada dentro del área. De tal forma, se estima que el área ocupada por esta especie en México es de aproximadamente 99,221.53 mil km², que equivalen al 5% del territorio nacional.

Sin embargo, a pesar de ser una especie restringida a México, *C. enyo* no se encuentra limitada a las cercanías de la localidad tipo (Cabo San Lucas, B.C.S; Grismer, 2002). En este contexto, se le asignó un valor de 5 en la escala de distribución geográfica.

7.2.1.2 Distribución ecológica

Para determinar la distribución ecológica de *C. enyo*, se observó su distribución en las ecorregiones de la PBC (González *et al.*, 2010). Para lo anterior, se ingresó en un SIG la base de datos depurada de los registros de presencia de *C. enyo* junto con el mapa digitalizado de las ecorregiones (Fig. 8). Como resultado del ejercicio anterior, se observó una mayor concentración de registros en la costa central del Golfo (28.2%), en los matorrales tropicales (21.8%) y en los desiertos Vizcaíno (13.7%) y Central (13.3%). En cambio, donde hubo menor

cantidad de registros fue en el desierto de San Felipe, y en las Sierras de La Giganta y La Laguna (Tabla 12).

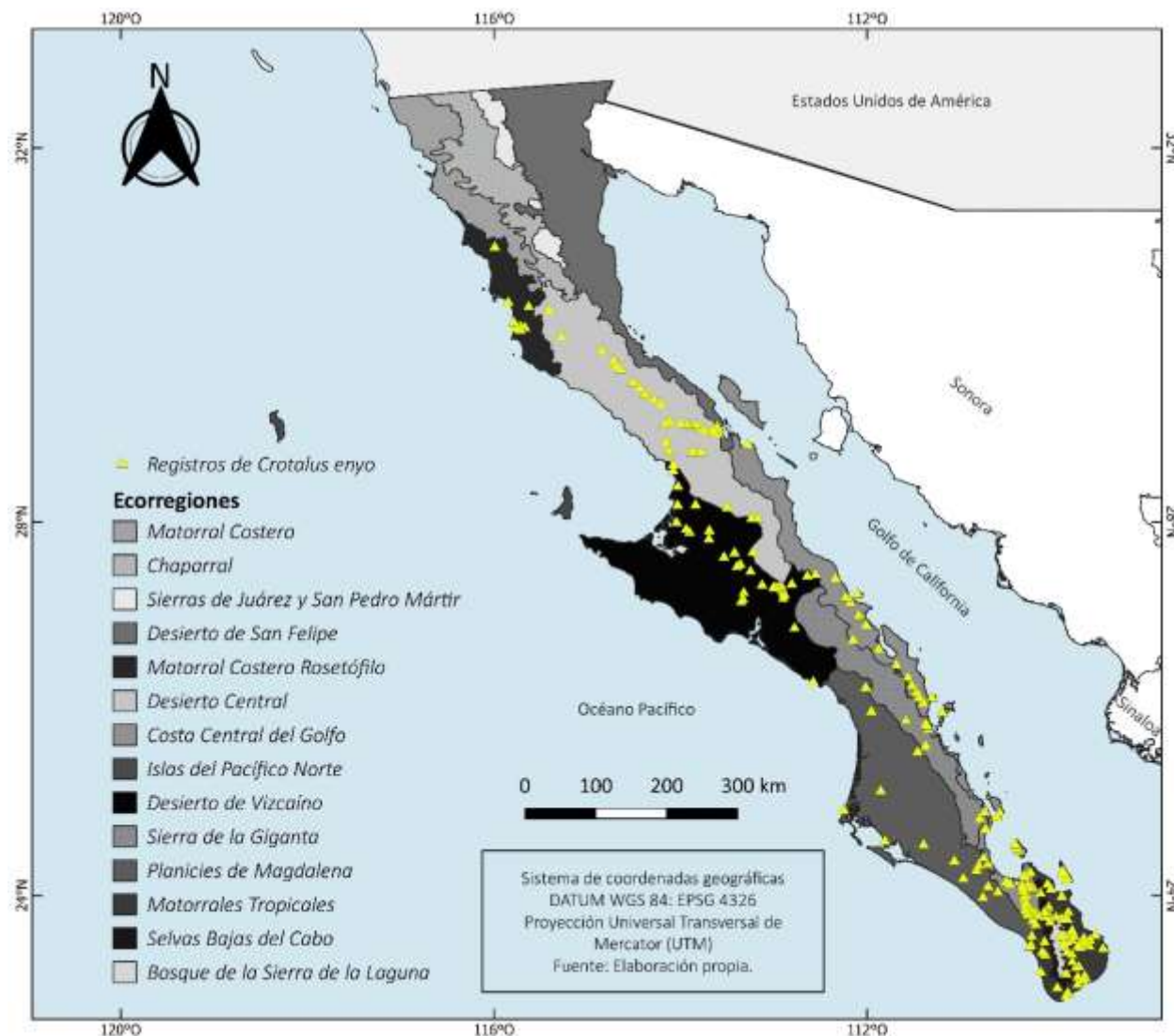


Figura 8. Distribución de los registros de presencia de *Crotalus enyo* en las ecorregiones de la Península de Baja California (modificado del mapa de González *et al.*, 2010).

Tabla 11. Registros de presencia de *Crotalus enyo* por ecorregión de la Península de Baja California.

Ecorregiones	Número de registros	Porcentaje
Matorral Costero	-	-
Chaparral	-	-
Sierras de Juárez y San Pedro Mártir	-	-
Desierto de San Felipe	4	1.7 %
Matorral Costero Rosetófilo	10	4.3 %
Desierto Central	31	13.3 %
Costa Central del Golfo	66	28.2 %
Islas del Pacífico Norte	-	-
Desierto de Vizcaíno	32	13.7 %
Sierra de La Giganta	3	1.3 %
Planicies de Magdalena	16	6.8 %
Matorrales Tropicales	51	21.8 %
Selvas Bajas del Cabo	20	8.5 %
Bosque de la Sierra La Laguna	1	0.4 %
Total	234	100 %

Se determinó que *C. enyo* está distribuida en 10 ecorregiones y se encuentra ausente del matorral costero, el chaparral, las Sierras de Juárez y San Pedro Mártir, y de las islas del Pacífico Norte; esto significa que la especie ocurre en ocho o más ecorregiones de la PBC. Por lo tanto, se le asignó un valor de 1 en la escala de distribución ecológica.

7.2.1.3 Grado de persecución humana

En comparación con otras serpientes de México, las serpientes de cascabel están significativamente más amenazadas debido a que, al ser especies venenosas, son consideradas como un peligro para la población humana y constantemente son sacrificadas en caso de ser vistas (Grismer, 2002; Wilson *et al.*, 2013; Maritz *et al.*, 2016).

También se ha registrado la colecta ilegal de *C. enyo* en la región (Grismer, 2002), la cual se debe principalmente al alto valor económico que le confiere su rareza al ser endémica. Sin embargo,

no se ha determinado el impacto que tiene dicha actividad sobre la especie. Por lo tanto, se le asignó un valor de 5 de grado de persecución humana.

Como resultado de la sumatoria de los valores asignados en cada escala, se obtuvo un puntaje total de 11. Por lo tanto, se determinó que la serpiente de cascabel *Crotalus enyo* es una especie con vulnerabilidad media a la degradación ambiental (Tabla 11).

Tabla 12. Evaluación del estado de conservación de *Crotalus enyo* mediante el EVS.

Escalas	Descripción	PVA*
1. Distribución geográfica	Restringida a México, pero no limitada a las cercanías de la localidad tipo	5
2. Distribución ecológica	Se encuentra en ocho o más ecorregiones	1
3. Grado de persecución humana	Especie venenosa, sacrificada de ser vista	5
Total		11

Notas: *Puntuación de Vulnerabilidad Ambiental.

7.2.2 Método de evaluación de riesgo de extinción de las especies silvestres en México (MER)

A continuación, se presentan los resultados de la evaluación del riesgo de extinción de *Crotalus enyo* mediante el MER:

7.2.2.1 Nombre científico válido, citado por la autoridad taxonómica

Crotalus enyo (Cope, 1861) en: COL (2021).

Caudisona enyo Cope, 1861, *Proc. Acad. Nat. Sci. Philadelphia*, 13. Lectotipo: ANSP 7761, designado por Beaman y Grismer (1994). Localidad tipo: "Habita en Baja California", colectado en Cabo San Lucas, B.C.S., México (Grismer, 2002).

7.2.2.1.1 Nombres científicos sinónimos

Caudisona enyo Cope, 1861.

7.2.2.1.2 Subespecies

- *C. e. enyo* (Cope, 1861)
- *C. e. furvus* (Lowe & Norris, 1954)
- *C. e. cerralvensis* (Cliff, 1954)

7.2.2.1.3 Nombres comunes

Nombre común en español: Serpiente de cascabel de Baja California (Grismer, 2002).

Nombre común en inglés: Baja California Rattlesnake (Grismer, 2002).

7.2.2.1.4 Clasificación taxonómica

- Reino: Animalia
- Filo: Chordata
- Clase: Reptilia
- Orden: Squamata
- Familia: Viperidae
- Género: *Crotalus*
- Especie: *enyo*

7.2.2.2 Evaluación

La serpiente de cascabel de Baja California (*Crotalus enyo*) se encuentra incluida en la NOM-059-SEMARNAT-2019 bajo la categoría de especie Amenazada (A). Como resultado de la presente evaluación, se mantiene a la especie en la categoría de Amenazada (A).

7.2.2.2.1 Criterio A. Amplitud de la distribución de *Crotalus enyo* en México

- Descripción de la distribución.
- Método de elaboración del mapa y evaluación del tamaño relativo de la distribución.

7.2.2.2.1.1 Descripción de la distribución

Crotalus enyo es una especie endémica a México, su distribución se extiende en la mayor parte de la PBC. En el norte, se encuentra en las cercanías de Cabo Colonet en la costa del Océano Pacífico y cerca de la Bahía de los Ángeles en la costa del Golfo de California. Desde estas localidades, *C. enyo* se distribuye hasta la región del Cabo en el extremo sur de la península. También se le ha registrado en las islas Magdalena y Santa Margarita del Océano Pacífico, y en las islas del Carmen, Cerralvo, Coronados, Espíritu Santo, Partida Sur, San Francisco, San José y San Marcos del Golfo de California (Grismer, 2002).

7.2.2.2.1.2 Método de elaboración del mapa y evaluación del tamaño relativo de la distribución

Con base en Grismer (2002), el mapa de distribución de *C. enyo* fue digitalizado en un SIG para obtener un polígono y estimar su superficie (Fig. 9). En dicho polígono, se incluyeron las superficies de las 10 islas en las cuales se encuentra *C. enyo* (Murphy *et al.*, 2002b; Aguirre *et al.*, 2010) y se eliminó el polígono correspondiente a la Sierra la Laguna, en la región meridional de la península, ya que en esta área no se distribuye la especie (Estrada-Hernández, 2010). Como resultado, se estima que la superficie ocupada por esta especie en México es de aproximadamente 99,221 km². Teniendo como referencia la superficie territorial de México, la cual es de 1,964,375 km² (INEGI, 2017), se determinó que la distribución de *C. enyo* equivale al 5% del territorio nacional. Por lo tanto, la serpiente de cascabel de Baja California fue calificada con 4 puntos en el criterio A del MER; es decir, se le considera como un taxón con distribución muy restringida ($\leq 5\%$) dentro del territorio nacional.

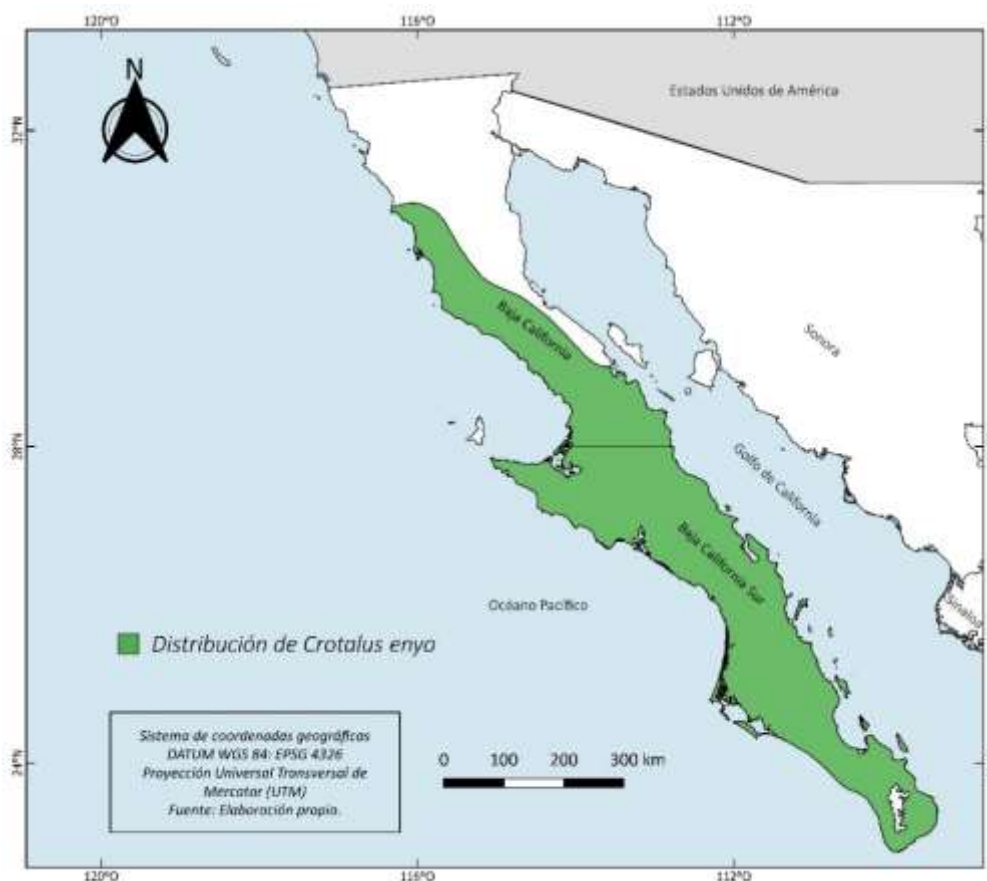


Figura 9. Distribución de *Crotalus enyo* en la Península de Baja California.

7.2.2.2.2 Criterio B. Estado del hábitat con respecto al desarrollo natural de *Crotalus enyo*

- Antecedentes (tipo de hábitat que ocupa la especie).
- Análisis diagnóstico del estado actual del hábitat y descripción de cómo se llevó a cabo la diagnosis.
- Evaluación del estado actual del hábitat con respecto a las necesidades naturales del taxón.

7.2.2.2.2.1 Antecedentes (tipo de hábitat que ocupa la especie)

Crotalus enyo se encuentra en una gran variedad de hábitats a lo largo de la PBC. Es un habitante común en las regiones costeras más frías del Océano Pacífico asociadas con el desierto de Vizcaíno y las Llanuras de Magdalena, aquí generalmente se le encuentra asociado con la vegetación de matorrales y rocas. También es común en la región tropical árida y en las selvas bajas del Cabo, a excepción de los bosques de encino y pino de la Sierra La Laguna y es escasa en las lomas aledañas. En su distribución más norteña, habita el matorral costero de los

llanos de San Quintín y Santa María, donde se le suele encontrar entre la vegetación de bajo crecimiento en las mesetas costeras. Aunque *C. enyo* se encuentra en las regiones áridas del sur, no se le localiza en las zonas extremadamente áridas del noreste de la PBC y no se encuentra en la costa este del estado de Baja California hasta cerca de Bahía de los Ángeles (Grismer, 2002). *C. enyo* está presente en el resto de la PBC. Se le ha reportado en las cercanías de las viviendas humanas (Grismer, 2002), debajo y dentro de las hierbas, maleza, debajo de rocas, en madrigueras, etc. En Isla Magdalena se le ha observado en las dunas de arena. También se la ha visto dentro de las dunas a lo largo de las playas de Isla Cerralvo (Grismer, 2002). Hay reportes de que *C. enyo* se sube a los arbustos y que también se le puede encontrar a 1-1.5 m sobre el suelo (Grismer, 2002). En la región del Cabo, donde predomina la vegetación de selva baja caducifolia, se le encuentra principalmente en áreas con cobertura arbustiva y también se la ha visto en suelo desnudo, cobertura arbórea, pendientes, rocas, suculentas, herbáceas y materia vegetal en descomposición (Carbajal-Márquez, 2013). Generalmente, *C. enyo* se localiza desde el nivel del mar hasta los 900 msnm (Estrada-Hernández, 2010). En la región del Cabo, se le puede encontrar desde el nivel del mar hasta los 943 msnm, principalmente entre los 400-499 msnm, esto debido a que en esta franja se concentra la mayor parte de la vegetación de selva baja (Lowe y Norris, 1954; Grismer, 2002; Carbajal-Márquez, 2013). De las 14 ecorregiones de la PBC, *C. enyo* se encuentra en 10. Se la puede encontrar en el matorral costero rosetófilo, en los desiertos Central, de San Felipe y Vizcaíno, en la costa central del Golfo, en la Sierra de La Giganta, las planicies de Magdalena, los matorrales tropicales, las selvas bajas del Cabo y también se la puede observar, aunque más escasa, en las laderas aledañas a los bosques de la Sierra La Laguna (Fig. 8).

7.2.2.2.2 Análisis diagnóstico del estado actual del hábitat

En general, se considera que el hábitat de *C. enyo* se encuentra en buen estado. La mayor parte de su distribución se encuentra dentro del estado de Baja California Sur, el cual es el estado con menos áreas urbanas de México (INEGI, 2017b). Utilizando el programa de QGIS ver. 3.16, se estimó que las zonas urbanas sólo abarcan el 0.34% de la distribución total de *C. enyo*. También cabe mencionar que, dentro de su distribución, se encuentran un total de ocho Áreas Naturales Protegidas (ANP) bajo la dirección de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas

(CONANP) de la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), las cuales le confieren cierta protección a las especies que aquí habitan. Estas ANP son: el Área de Protección de Flora y Fauna (APFF) Islas del Golfo de California, el APFF Balandra, la Reserva de la Biósfera (RB) El Vizcaíno, la RB Sierra La Laguna, el APFF Valle de los Cirios, el Parque Nacional (PN) Bahía de Loreto, la RB Islas del Pacífico de la Península de Baja California y el PN Archipiélago de Espíritu Santo. Cabe mencionar que el APFF Valle de los Cirios y la RB El Vizcaíno son de las ANP terrestres con mayor extensión territorial en México, en conjunto abarcan un total de 5,122 km² de superficie.

Sin embargo, en la región del Cabo, al sur de la PBC, es un área donde más se ha registrado crecimiento de las zonas urbanas en los últimos años (Llovich *et al.*, 2009; Santiago *et al.*, 2014), por lo que es posible que las poblaciones de *C. enyo* presentes en las áreas aledañas se estén viendo afectadas por actividades antropogénicas tales como el aumento de desarrollos turísticos en zonas costeras para la construcción de fraccionamientos habitacionales, complejos hoteleros y campos de golf. Por otra parte, cabe mencionar que dentro de las planicies de Magdalena, se encuentra ubicada la región agrícola más extensa del estado de Baja California Sur (Santiago *et al.*, 2014), donde se practican diversas actividades como la ganadería y agricultura, las cuales también pueden estar afectando a las poblaciones de *C. enyo* que se encuentran en la región.

Respecto a los factores estocásticos que pueden estar afectando el hábitat donde se encuentra *C. enyo*, la PBC se enfrenta continuamente a sequías, las cuales han ido en aumento en las últimas décadas (Méndez y Magaña, 2010). La prolongación de las sequías provoca una menor disponibilidad de presas para la *C. enyo* debido a que dichas presas se alimentan de la vegetación, la cual es perjudicada gravemente con las sequías. También cabe mencionar que la PBC es afectada cada año por la incidencia de huracanes, lo cual puede estar perjudicando a las poblaciones de *C. enyo* debido a los daños que estos fenómenos provocan en su hábitat, debido al arrastre de suelo y materia orgánica por las corrientes de agua.

7.2.2.2.3 Evaluación del estado actual del hábitat con respecto a las necesidades naturales del taxón

Al analizar el estado actual del hábitat de *C. enyo*, este se encuentra afectado cada año por fenómenos estocásticos tales como sequías y huracanes, así como por el crecimiento de las áreas urbanas principalmente al sur de su distribución. Si sólo se consideran estos factores, se pudiera determinar que el hábitat es hostil o poco limitante para la especie, pero debido a que *C. enyo* no presenta especificidad a un solo tipo de hábitat y se le puede encontrar ampliamente distribuida a lo largo de la PBC, se le otorgó un valor de 2 para este criterio (hábitat intermedio o limitante) del MER.

7.2.2.2.3 Criterio C. Vulnerabilidad biológica intrínseca de *Crotalus enyo*

- Antecedentes (historia de vida) de la especie.
- Análisis diagnóstico del estado actual de la especie y descripción de cómo se obtuvo dicha diagnosis.
- Evaluación de qué factores la hacen vulnerable.

7.2.2.2.3.1 Antecedentes (historia de vida) de la especie

La serpiente de cascabel *Crotalus enyo* es una serpiente venenosa perteneciente a la familia Viperidae (Grismer, 2002). Debido a las características biológicas de *C. enyo*, no se ha determinado con exactitud su patrón de actividad anual. De acuerdo con Carbajal-Márquez (2013), en la región del Cabo, *C. enyo* presenta un patrón de actividad unimodal, con un solo pico en los meses de julio a noviembre. Este incremento en la actividad de la especie está asociado a la temporada de lluvias en la región, lo cual provoca un aumento en la disponibilidad de las presas, debido al incremento en la productividad primaria, por lo que las serpientes se encuentran más activas en busca de alimento. Durante la temporada fría (diciembre a febrero) presenta menor actividad. De acuerdo con Grismer (2002), al norte del desierto de Vizcaíno, *C. enyo* suele estar inactiva durante el invierno. En general, el periodo de actividad se considera de finales de marzo hasta principios de noviembre, siendo el periodo de mayor actividad durante los meses de septiembre y octubre, principalmente desde el sur de Bahía de los Ángeles. Durante el verano, generalmente es de hábitos nocturnos, mientras que en la primavera

también puede presentar actividad principalmente en las primeras horas de la mañana. En la región del Cabo, *C. enyo* es una especie principalmente nocturna (Carbajal-Márquez, 2013). Grismer (2002) afirma haber observado individuos activos durante las noches frías de otoño en el centro de Baja California.

C. enyo se alimenta principalmente de mamíferos pequeños pertenecientes a los géneros *Peromyscus*, *Chaetodipus*, *Dipodomys* y *Thomomys*, y de lagartijas de los géneros *Sceloporus*, *Dipsosaurus*, *Uta*, *Aspidoscelis* y *Ctenosaura* (Taylor, 2001; Carbajal *et al.*, 2016). Taylor (2001) reporta que los individuos adultos también se pueden alimentar de cienpiés del género *Scolopendra*. En la región del Cabo, Carbajal *et al.* (2016) mencionan que la dieta de *C. enyo* consiste principalmente de roedores del género *Chaetodipus* (83.34%) y lagartijas de los géneros *Ctenosaura*, *Sceloporus* y *Aspidoscelis* (16.66%), y no reportan cienpiés del género *Scolopendra* dentro de su dieta. En su etapa juvenil, los individuos se alimentan principalmente de lagartijas pequeñas, mientras que de adultos cambian su alimentación y su principal presa son los roedores. A diferencia de otras serpientes de cascabel de la PBC, *C. enyo* suele ser un depredador activo y no se queda inmóvil esperando a sus presas (Grismer, 2002). Carbajal *et al.* (2016) sugieren que *C. enyo* pudiera ser un depredador especialista en la zona.

Se sabe poco acerca de la biología reproductiva de la serpiente de cascabel *C. enyo* y existe poca literatura al respecto. Taylor (1999) menciona que en promedio pueden nacer de 1 a 10 crías durante el otoño, aunque estos también pueden ocurrir durante la primavera. Se han reportado nacimientos a finales de marzo (Klauber, 1931; Tryon y Radcliffe, 1977) y Grismer (2002) reporta haber observado crías a finales de julio en Loreto, a inicios de agosto al oeste de Bahía de los Ángeles, a mediados de agosto cerca de San Ignacio y desde inicios de septiembre a mediados de octubre en la región del Cabo; por lo tanto, sugiere que los apareamientos ocurren en la primavera y los nacimientos durante el verano e inicios de otoño. Campbell y Lamar (2004) reportan el nacimiento de siete crías durante el mes de noviembre, aunque también observaron nacimientos entre abril y mayo. Al igual que otras serpientes de cascabel de América del Norte, la ovulación de *C. enyo* comienza en primavera, mientras que la formación de los espermatozoides sucede durante el verano y otoño, los cuales son almacenados en los vasos deferentes durante el invierno (Goldberg y Beaman, 2003). Las crías suelen nacer a finales del

verano. Goldberg y Beaman (2003) sugieren que durante los periodos de mayor abundancia de presas para *C. enyo*, las hembras pudieran reproducirse anualmente, mientras que en los periodos en los cuales los recursos escasean, la reproducción de *C. enyo* puede ocurrir con menor frecuencia.

La serpiente de cascabel *C. enyo* se encuentra principalmente en áreas donde la temperatura media anual varía entre los 18 y 26 °C, con temperaturas máximas de 32 – 38°. Estrada-Hernández (2010) menciona que sólo el 0.5% de los registros de colecta de *C. enyo* se encuentra en áreas donde la temperatura supera los 40° C. También menciona que sólo el 1.03% de los registros de *C. enyo* se encuentra en áreas donde las temperaturas son menores a los 4° C. Esta información sugiere que la especie tiene poca tolerancia a temperaturas climáticas extremas. Respecto a la precipitación de las áreas donde habita *C. enyo*, la mayoría de los registros se han reportado en zonas donde la precipitación media anual varía entre los 50-250 mm (Estrada-Hernández, 2010).

Respecto a la abundancia poblacional de *C. enyo*, en la literatura no existe ningún registro de abundancia de esta especie. Con base en datos de muestreos llevados a cabo por Arnaud-Franco (comunicación personal) durante los años 2010-2020 en 32 localidades diferentes de la PBC, en los cuales se acumularon 384 hrs de búsqueda nocturna, sólo se encontraron 5 individuos de *C. enyo*. Estos datos demuestran que es una especie poco abundante en las áreas donde habita.

7.2.2.3.2 Análisis diagnóstico del estado actual de la especie

El diagnóstico del estado actual de la especie se basa en la literatura consultada sobre la historia de vida de *C. enyo* (Taylor, 1999, 2001; Grismer, 2002; Goldberg y Beaman, 2003; Campbell y Lamar, 2004; Estrada-Hernández, 2010; Carbajal-Márquez, 2013; Carbajal *et al.*, 2016) y en los datos de abundancia poblacional proporcionados por Arnaud, los cuales son resultado de los muestreos de campo llevados a cabo en un periodo de 10 años.

7.2.2.3.3 Evaluación de qué factores la hacen vulnerable

Al igual que otras especies de serpientes de cascabel, *C. enyo* tiene un crecimiento lento, tarda varios años en alcanzar la maduración sexual y, dependiendo de la disponibilidad de alimento, pueden pasar varios años entre cada periodo reproductivo (Grismer, 2002; Goldberg y Beaman, 2003). Estos factores, sumados a que es una especie poco abundante en las áreas donde habita y a su baja presencia en zonas donde las temperaturas son extremas, incrementan su vulnerabilidad a la degradación ambiental. Al considerar los factores que la hacen vulnerable, se le adjudica vulnerabilidad alta a *C. enyo*. Por ello, se asignó un valor de 3 en el criterio C del MER.

7.2.2.4 Criterio D. Impacto de la actividad humana sobre *Crotalus enyo*

- Factores de riesgo reales y potenciales con la importancia relativa de cada uno de ellos.
- Análisis pronóstico de la especie.
- Evaluación del impacto.

7.2.2.4.1 Factores de riesgo reales y potenciales con la importancia relativa de cada uno de ellos

En la PBC, las actividades antropogénicas afectan directamente a las serpientes de cascabel que aquí habitan. Por ser especies venenosas son consideradas como un peligro para la población humana, por lo que constantemente son sacrificadas en caso de ser vistas (Grismer, 2002). Otro factor que afecta a la serpiente de cascabel *Crotalus enyo* es el cambio de uso de suelo a zonas urbanas, principalmente en la región del Cabo, ya que aquí es donde se ha registrado un mayor crecimiento de las áreas urbanas y de los desarrollos turísticos en las zonas costeras (Llovich *et al.*, 2009; Santiago *et al.*, 2014). En las zonas aledañas a los complejos hoteleros de Cabo San Lucas y San José del Cabo, al sur de la península, se han reportado diversos avistamientos de *C. enyo* (Armando Cruz, comunicación personal). También cabe mencionar que, en las planicies de Magdalena, en el valle de Santo Domingo, se encuentra la región agrícola más extensa del estado de Baja California Sur, lo que sugiere que se ha modificado de manera significativa el uso de suelo dentro del área de distribución de la especie. En estas áreas es donde se ha registrado

un mayor impacto antropogénico a la especie, aunque en el resto de la PBC, también se pueden observar estas actividades, pero en menor proporción.

Se ha registrado la colecta ilegal de *C. enyo*, la cual se debe principalmente al valor económico que le confiere su rareza al ser una especie endémica de la región. Sin embargo, no ha sido determinado el impacto que tiene dicha actividad sobre las poblaciones de la especie.

Cabe mencionar que se han reportado diversos individuos de *C. enyo* atropellados en las carreteras de la región del Cabo, durante el periodo de un año (2011-2012) en el cual se encontraron un total de 14 serpientes atropelladas, principalmente en los meses de julio a noviembre (Carbajal-Márquez, 2013). Estos atropellamientos también han sido reportados en otras localidades de la península (Arnaud-Franco, comunicación personal).

7.2.2.4.2 Análisis pronóstico de la especie

Como pronóstico de la especie, el deterioro del hábitat de la *C. enyo* se centra principalmente en la región del Cabo debido al cambio de uso de suelo a áreas urbanas. A causa de su endemismo, se ha registrado la colecta ilegal de la especie. También, se han reportado atropellamientos de ejemplares de *C. enyo* en las carreteras de la península. A pesar de que diversos factores antropogénicos inciden negativamente sobre la especie, *C. enyo* no es abundante, por lo que no se sabe cuál ha sido el impacto sobre sus poblaciones.

7.2.2.4.3 Evaluación del impacto

Teniendo en cuenta las actividades antropogénicas que inciden directamente sobre las poblaciones de *C. enyo* y a que es una especie poco abundante en las regiones donde habita, se considera que el factor antropogénico tiene un bajo impacto sobre la especie. Esto equivale a un valor de 2 en el criterio D del MER.

7.2.2.2.5 Valor asignado total del MER (Suma de los valores de los criterios A + B + C + D)

La puntuación obtenida para la serpiente de cascabel de Baja California (*Crotalus enyo*) indica que es una especie Amenazada (Tabla 13).

Tabla 13. Evaluación del estado de conservación de *Crotalus enyo* mediante el MER.

Criterios	Descripción	Puntaje
Distribución (Criterio A)	Muy restringida	4
Hábitat (Criterio B)	Intermedio o limitante	2
Vulnerabilidad (Criterio C)	Vulnerabilidad alta	3
Impacto humano (Criterio D)	Bajo impacto	2
Total		11

7.3 Análisis de rareza

Siguiendo la metodología de Rabinowitz (1981), se catalogó a la serpiente de cascabel *Crotalus enyo* como una especie rara, específicamente de rareza Alta Intermedia (AI) debido a que es rara en dos de las tres variables que se analizaron en total (Tabla 14).

Tabla 14. Evaluación de la categoría de rareza de *Crotalus enyo*.

Variables	Descripción	Rareza
Distribución geográfica	Reducida	X
Especificidad del hábitat	Amplia	
Abundancia local	Reducida	X
Categoría de rareza	→	Alta Intermedia (AI)

7.3.1 Distribución geográfica

Para determinar el tamaño de la distribución geográfica de *C. enyo*, se tomó como referencia la superficie total de la distribución de *C. enyo* en México, la cual fue estimada de acuerdo con el

mapa de Grismer (2002). Como resultado, se obtuvo una superficie total estimada de 99,221 km². Si se tiene como referencia que la superficie territorial de México es de 1,964,375 km² (INEGI, 2017), el área ocupada por esta especie equivale al 5% del territorio nacional.

Como resultado del ejercicio anterior, se determinó que *C. enyo* tiene una distribución geográfica reducida ya que representa menos del 50% del territorio nacional.

7.3.2 Especificidad del hábitat

Crotalus enyo se encuentra en diversos hábitats de la PBC. Es común en las regiones costeras más frías del Océano Pacífico asociadas con el desierto de Vizcaíno y las planicies de Magdalena, aquí generalmente se le encuentra asociada a la vegetación de matorrales y rocas. También es común en los matorrales tropicales y en las selvas bajas del Cabo, a excepción de los bosques de encino-pino de la Sierra La Laguna, y es escasa en las lomas aledañas. Al norte de su distribución, habita en los matorrales costeros rosetófilos, donde se le suele encontrar entre la vegetación de bajo crecimiento. A pesar de que se la encuentra en las regiones áridas del sur, no se distribuye en las zonas extremadamente áridas del noreste de la PBC y tampoco se encuentra en la costa del este del estado de Baja California; en esta región, solo se ha observado cerca de Bahía de los Ángeles. Se le ha reportado en las cercanías de las viviendas humanas. En otros lugares se le observa debajo y dentro de la maleza, debajo de rocas, en madrigueras, etc. En las islas Magdalena y Cerralvo se le ha observado en las dunas de arena a lo largo de las playas. Hay reportes de que *C. enyo* se sube a los arbustos y que también se le puede encontrar a 1-1.5 m sobre el suelo. En la región del Cabo, donde predomina la vegetación selva baja caducifolia, se le encuentra principalmente en áreas con cobertura arbustiva y también se la ha visto en suelo desnudo, cobertura arbórea, pendientes, rocas, suculentas, herbáceas y materia vegetal en descomposición. Generalmente, *C. enyo* se localiza desde el nivel del mar hasta los 900 msnm. En la región del Cabo, se le puede encontrar desde el nivel del mar hasta los 943 msnm, principalmente entre los 400-499 msnm, esto debido a que en esta franja se concentra la mayor parte de la vegetación de selva baja (Lowe y Norris, 1954; Grismer, 2002; Carbajal-Márquez, 2013).

De las 14 ecorregiones de la PBC, *C. enyo* se encuentra en 10. Se la puede encontrar en el matorral costero rosetófilo, en los desiertos Central, de San Felipe y Vizcaíno, en la costa central del Golfo, en la Sierra de La Giganta, las planicies de Magdalena, los matorrales tropicales, las selvas bajas del Cabo y también se la puede observar, aunque más escasa, en las laderas aledañas a los bosques de la Sierra La Laguna (véase Fig. 8).

Dado que *C. enyo* se encuentra en una gran variedad de hábitats a lo largo de la PBC, se considera que la especie tiene una especificidad del hábitat amplia.

7.3.3 Tamaño de la población local

La abundancia local de *C. enyo* se estimó con base en muestreos poblacionales llevados a cabo durante 10 años (periodo 2010-2020) por Arnaud-Franco (comunicación personal), en 32 localidades de la PBC. En los muestreos se acumularon 384 hrs de búsqueda nocturna y sólo se encontraron 5 individuos de *C. enyo*. Por lo tanto, la abundancia relativa al esfuerzo de muestreo de *C. enyo* es de 0.013 serpientes/hr de búsqueda.

Como resultado de lo anterior, se determinó que la especie tiene un tamaño poblacional reducido y no es dominante en las localidades donde habita, esto si se compara con la abundancia poblacional de otras serpientes de cascabel de la región como *C. ruber* y *C. mitchellii*, cuyas abundancias relativas son de 0.254 y 0.253 serpientes/hr de búsqueda respectivamente (Arnaud, 2015).

8. DISCUSIÓN

8.1 Modelo de nicho ecológico de *Crotalus enyo*

Los resultados observados respecto a la distribución de los registros de *Crotalus enyo* en relación con la temperatura ambiental, nos muestran que la especie tiene preferencia por sitios con temperaturas cálidas, ya que alrededor del 50% se localizaron entre los 18 y 26 °C, evitando sitios con temperaturas mayores a los 40 °C y menor a los 4 °C. Esto difiere de los resultados obtenidos por Estrada-Hernández (2010), en donde cerca del 90% de las colectas de *C. enyo* se observaron en temperaturas entre los 18 y 26 °C; si bien hubo colectas en temperaturas mayores a 40 °C y a 2 °C, se infiere que tiene poca tolerancia a temperaturas extremas, en comparación con otras especies de *Crotalus* de la PBC, ya que *C. enyo* prefiere una temperatura media anual de 21.4 °C mientras que especies como *C. ruber* tienen preferencia por una temperatura media de 27.1 °C (Pañeda-Ramírez, 2019).

En cuanto a la distribución de los registros de *C. enyo* en relación con la precipitación, se muestra que la especie tiene preferencia por los sitios con mayores precipitaciones. Si se tiene en cuenta que la precipitación media anual dentro de su área de distribución es de 98.7 mm en el estado de Baja California (INEGI, 2017a) y 215.7 mm en Baja California Sur (INEGI, 2017b) y que *C. enyo* se distribuye mayormente en sitios donde la precipitación media es de 234 mm y la máxima de 571 mm, se puede deducir la razón por la que se distribuye mayormente en B.C.S.; específicamente en la región del Cabo, en donde las precipitaciones promedio son de 335.3 mm (INEGI, 2017b). Lo anterior discrepa de lo registrado por Estrada-Hernández (2010), dado que la precipitación media anual fue de 180.6 mm y la máxima de 434 mm. Por consiguiente, es posible que *C. enyo* haya desarrollado una menor tolerancia a las sequías durante la última década. Esta es una hipótesis que habrá que probarse.

En relación con la distribución altitudinal de los registros de *C. enyo*, se muestra que prefiere sitios con bajas elevaciones, puesto que alrededor del 80% de las localidades se encontraron en altitudes menores a los 500 msnm. Lo anterior coincide con el trabajo de Estrada-Hernández (2010), en el cual reportó cerca del 90% de los registros en altitudes menores a los 600 msnm. No obstante, anteriormente se había reportado que la mayor elevación donde se podría

encontrar a *C. enyo* es a los 900 msnm (Estrada-Hernández, 2010), mientras que en el presente trabajo se encontró un registro a una altitud de 943 msnm en las áreas aledañas a la Sierra La Laguna. Por lo tanto, se considera que es mayor su rango altitudinal. Es importante resaltar la relación que hay entre la disminución de las temperaturas ambientales a mayor altitud y la preferencia de *C. enyo* por temperaturas cálidas.

Con respecto a los tipos de vegetación y uso de suelo de la PBC, la mayor cantidad de registros de *C. enyo* se encuentra en los matorrales sarcocaulé y sarco-crasicaulé (51.7%), así como en la selva baja caducifolia (19.6%). Esto implica una preferencia por sitios con vegetación arbustiva y arbórea, a comparación de otras especies de *Crotalus* cuya mayor preferencia son los sitios donde predominan las cactáceas, así como suelos rocosos, tales como *C. ruber* y *C. mitchellii* (Grismer, 2002; Brown *et al.*, 2008; Murillo-Quero, 2009; Glaudas y Rodríguez, 2011). Lo anterior coincide con el comportamiento reportado por Carbajal-Márquez (2013), dado que menciona haber observado individuos de *C. enyo* a 1-1.5 m sobre el nivel del suelo, enrollada en la vegetación; también reporta que prefiere hábitats con cobertura arbustiva y arbórea. Estrada-Hernández (2010) menciona que la mayoría de las localidades de colecta de *C. enyo* se encuentran en vegetación semidesértica con arbustos y bosques deciduos con árboles menores de 15 m, lo cual concuerda con las características de los tipos de vegetación donde se registró mayormente a la especie.

Se observó una mayor cantidad de registros de colecta de *C. enyo* en los suelos de tipo regosol (54.3%), los cuales se caracterizan por ser poco fértiles, con escasa materia orgánica y retener poca humedad (SEMARNAT, 2002; SEMARNAT, 2016). Los regosoles son característicos de regiones secas-cálidas y se encuentran mayormente al pie de las serranías, ya que, al ser acarreados por el agua que desciende de las montañas, se depositan en estas zonas (SEMARNAT, 2002). Lo anterior coincide con el uso de hábitat de *C. enyo* observado por Carbajal-Márquez (2013), en donde hubo pocos registros de *C. enyo* en sitios con materia orgánica en descomposición. Puesto que *C. enyo* no se observa en las sierras de la PBC a altitudes mayores a los 943 msnm y a que los suelos regosoles son comunes al pie de las serranías, la acumulación de registros en los suelos regosoles concuerda con la distribución altitudinal de la especie. Por otra parte, el 13.2% de las localidades de *C. enyo* se observó en

suelos litosoles, los cuales se caracterizan por tener poca profundidad y son comunes en las regiones áridas de México (SEMARNAT, 2002; SEMARNAT, 2016). Estrada-Hernández (2010) reportó una acumulación de registros de *C. enyo* en suelos con textura gruesa (75.8%), lo cual es similar a lo observado en el presente trabajo (67.5%).

Acerca de los resultados obtenidos de las variables más relevantes para predecir la ocurrencia de *C. enyo*, se determinó que la estacionalidad de la precipitación, el tipo de vegetación y uso de suelo, así como la precipitación del cuatrimestre más frío, fueron las variables más importantes. La estacionalidad de la precipitación nos indica que, entre mayor variabilidad de precipitación hay entre estaciones, hay una mayor afectación en la probabilidad de la presencia de la especie. Lo anterior está relacionado al cambio drástico de precipitación que hay entre estaciones en la región, ya que durante la temporada seca (marzo-junio) hay precipitaciones mínimas de 0 mm y en la temporada de lluvias de verano (julio-octubre), pueden presentarse precipitaciones máximas de hasta 956 mm (Salinas *et al.*, 1990; INEGI, 2017b). Si se tiene en cuenta la importancia que tienen las lluvias para el mantenimiento de los ecosistemas desérticos, se entiende la relación que hay con el aumento de la probabilidad de ocurrencia al haber un incremento drástico en la precipitación. Por otro lado, las sequías son recurrentes dentro del área de distribución de *C. enyo* (Troyo *et al.*, 2014; SEMARNAT, 2016), las cuales afectan negativamente la presencia de la especie debido a que la escasez de lluvia se traduce en una menor disponibilidad de presas para las serpientes de cascabel. Sin embargo, su efecto directo en las serpientes de cascabel aún no ha sido estudiado en la región.

Se observó que el tipo de vegetación y uso de suelo es de las variables que mayor predicen la ocurrencia de *C. enyo*, dado que presentó tendencias por ciertos tipos de vegetación, como los matorrales sarcocaula y sarcocrasicaule, así como la selva baja caducifolia, lo cual aumentó significativamente su probabilidad de ocurrencia en estos sitios. El tipo de vegetación es relevante debido al uso de hábitat que les dan las especies, como es el caso de *C. enyo* donde se ha reportado su preferencia por sitios con componentes mayormente arbustivos y arbóreos (Grismer, 2002; Estrada-Hernández, 2010; Carbajal-Márquez, 2013). Lo anterior nos muestra la importancia de incluir variables categóricas en los modelados de nicho, lo cual ya había sido sugerido por otros autores (Estrada-Hernández, 2010).

La precipitación del cuatrimestre más frío también contribuyó, aunque en menor proporción, a la probabilidad de ocurrencia de *C. enyo*. Se observó una correlación inversa ya que, entre mayor era la precipitación en los meses más fríos del año, menor era la probabilidad de ocurrencia de la especie. Esto se debe a que las lluvias en temperaturas frías afectan la capacidad de termorregulación en las serpientes, porque la precipitación disminuye aún más la temperatura del suelo. El suelo es un conducto importante del cual las serpientes de cascabel obtienen calor para regular su temperatura, al ser especies ectotermas (Peterson *et al.*, 1993). Lo anterior tiene relación con lo observado en el mapa de distribución potencial de *C. enyo* y el por qué no se distribuye al norte de Camalú, dado que en la región de Ensenada se encuentra el tipo de clima mediterráneo (Cs), cuya característica principal son la presencia de lluvias durante el invierno (INEGI, 2017a).

Los modelos de nicho ecológico generados arrojaron valores altos de AUC, (mayores a 0.8), lo que indica una buena representatividad para predecir la presencia de la especie y también que se pueden utilizar para propósitos de conservación de *C. enyo* (Urbina y Flores, 2010). Con base en los valores de desempeño, se optó por elegir un modelo que incluía tanto variables continuas como categóricas, a pesar de que normalmente solo se utilizan variables continuas. Esto coincide con las recomendaciones del trabajo de Estrada-Hernández (2010), en donde se comenta la importancia del uso de variables categóricas ya que ayudan a delimitar los sitios de presencia de las especies. Lo anterior se debe a que las composiciones vegetales y los tipos de suelo están asociados a barreras geográficas tales como sierras o cadenas montañosas, lo cual ya se ha comentado que ayudan a predecir la presencia de *C. enyo* por su estrecha distribución altitudinal.

En el mapa del modelo de nicho ecológico se pudieron observar claramente los límites de la distribución potencial de *C. enyo*. En el norte de la PBC se observa la interrupción de su distribución por la presencia de 3 barreras principales: 1) El clima mediterráneo, el cual se encuentra por la región costera del Pacífico al norte de Camalú, 2) en el centro de la PBC, por las Sierras de San Pedro Mártir, Juárez y San Miguel y 3) la Sierra de La Asamblea, la cual se localiza por la región costera del Golfo de California al norte de Bahía de los Ángeles. Lo anterior se puede explicar por la altitud que alcanzan dichas sierras, ya que en la Sierra de San Pedro Mártir

hay elevaciones de hasta 3,050 msnm y la Sierra de La Asamblea elevaciones de hasta 1,660 msnm (INEGI, 2017a), sitios donde no se han reportado registros de *C. enyo*.

En general, el modelo de distribución potencial coincide con el mapa de distribución de la especie publicado por Grismer (2002). Sin embargo, se observan algunas discrepancias, dado que en el mapa de Grismer (2002) la distribución de *C. enyo* se muestra como un continuo desde la región del Cabo hasta Camalú en Baja California, y no se tiene en cuenta que la especie no se encuentra en sitios con altitudes mayores a los 943 msnm, tales como el cerro La Sandía y las Sierras de San Francisco, Guadalupe, San Pedro, La Giganta, etc. Por lo tanto, se sugiere se eliminen dichas áreas en el mapa de distribución de *C. enyo*.

Cabe resaltar que se observó una afinidad de la especie por la vertiente del Golfo de California, en comparación con la del Océano Pacífico. Es posible que esto sea debido a que la región del Pacífico es de las más secas de la PBC, con precipitaciones anuales entre los 50-100 mm (García, 1998b) mientras que *C. enyo* prefiere sitios con precipitaciones medias de 234 mm. También esta región tiene influencia de corrientes de aire frío provenientes del Océano Pacífico durante ciertas temporadas del año, mientras que el Golfo de California tiende a ser más cálido la mayor parte del año (INEGI, 2017), lo que favorece la presencia de *C. enyo*. Por otra parte, al comparar el mapa de distribución potencial con la clasificación de los tipos de clima de Köppen (García, 1998a), se determinó que *C. enyo* tiene preferencia por los tipos de clima árido y semiárido.

Con base en el mapa de distribución potencial de *C. enyo*, se determinó que el área que abarca desde el istmo de la Paz hacia el sur, en la región del Cabo, es la de mayor importancia para la conservación de la especie. En dicha región se observó una mayor afinidad por la vertiente del Golfo de California en comparación a la del Océano Pacífico, lo cual se comentó anteriormente. De las 10 islas en las que está registrada la especie, se determinó que las islas Espíritu Santo y Cerralvo son las de mayor importancia para la conservación de *C. enyo*, visto que presentaron una mayor probabilidad de ocurrencia de la especie, posiblemente por su cercanía a la región del Cabo. Es importante resaltar que en la isla Cerralvo se encuentra una de las subespecies de *C. enyo*, que es *C. e. cerralvensis* (Grismer, 2002), de la cual aún no se tiene información sobre

su estado poblacional. Por lo anterior, se recomiendan futuras investigaciones sobre la abundancia de la especie en la isla.

Se plantea que las preferencias de hábitat de *C. enyo* hacia temperaturas cálidas, altas precipitaciones, vegetación de selva baja caducifolia y matorral, así como a bajas elevaciones, está relacionado con su origen filogenético. A diferencia de lo que se esperaría, *C. enyo* no se encuentra mayormente emparentada con otras especies de *Crotalus* de la PBC, tales como *C. ruber* y *C. mitchellii*, sino que tiene mayor relación con las especies del complejo *C. durissus* (Murphy *et al.*, 2002a). En este complejo se encuentran especies que tienen mayor afinidad a regiones neotropicales, como por ejemplo la serpiente *C. basiliscus* que se distribuye en la costa del Pacífico Mexicano (Ramírez y Hernández, 2004) y *C. durissus*, la cual se puede encontrar desde el sur de México hasta Sudamérica (Calderón, 2002). Se ha planteado que el parentesco entre *C. enyo* con el complejo *C. durissus* está estrechamente relacionado con la historia geológica de la PBC (Estrada-Hernández, 2010). Se cree que hubo un ancestro en común entre *C. enyo* y el complejo *C. durissus* que habitó en el México continental hasta principios del Mioceno, cuando la región del Cabo aún estaba adjunta. Se plantea que *C. enyo* se aisló de su ancestro en común que compartía con las serpientes de cascabel neotropicales, cuando la región del Cabo se separó del macizo continental a mediados del Mioceno (~12-14 Ma) (Murphy *et al.*, 2002a; Mulcahy y Macey, 2009). Posteriormente, la región del Cabo se unió al resto de la PBC en el Mioceno tardío, presuntamente por una serie de volcanes en ascenso que terminaron por formar la península (Mulcahy y Macey, 2009) y, en consecuencia, *C. enyo* comenzó a migrar hacia el norte y colonizó la península (Grismer, 2002; Murphy *et al.*, 2002a). Esta información soporta el patrón observado en el mapa de distribución potencial de *C. enyo*, donde se indica claramente que la especie tiene una mayor afinidad por las condiciones climáticas de la región del Cabo, así como por sus componentes vegetales.

8.2 Estado de conservación de *Crotalus enyo*

Con base en los criterios del EVS, se determinó que *Crotalus enyo* presenta una vulnerabilidad media a la degradación ambiental. Estos resultados coinciden con las evaluaciones realizadas por otros autores (Wilson *et al.* 2013; Johnson *et al.* 2017), en las cuales también se determinó

la vulnerabilidad de la especie como media. Sin embargo, es importante mencionar que los puntajes asignados a cada criterio del EVS, así como el puntaje final (PVA), fueron diferentes a los asignados en la presente evaluación. Específicamente, se observó una diferencia en el valor de la distribución ecológica de la especie, debido a que Wilson *et al.* (2013) y Johnson *et al.* (2017) analizaron la distribución ecológica de *C. enyo* en las regiones fisiográficas de México (escala nacional), mientras que en el presente trabajo fue aplicada solamente en las ecorregiones de la PBC (González *et al.*, 2010). Por lo tanto, se entiende porque dichos autores registraron un valor mayor de vulnerabilidad en la distribución ecológica.

El Índice de Vulnerabilidad Ambiental es una herramienta para determinar el estado de conservación de especies poco conocidas (Wilson *et al.*, 2013), como es el caso de *C. enyo*, dado que no se necesitan datos poblacionales y los resultados que se obtienen ayuda a identificar especies cuya conservación necesita atención inmediata. Cabe resaltar que el resultado que se obtuvo difirió de lo esperado, ya que se creía que la vulnerabilidad de *C. enyo* sería alta tanto por su distribución limitada en México, así como por el impacto de la actividad humana que padece al ser una especie venenosa. Sin embargo, su amplia distribución dentro de las ecorregiones de la PBC le confirió un valor menor de vulnerabilidad. En relación con la distribución ecológica de *C. enyo*, se observó que las ecorregiones en las que mayor se encuentra son la Costa Central del Golfo (CCG) y los Matorrales Tropicales (MT). Esto coincide con la probabilidad de ocurrencia observada en el mapa de distribución potencial de *C. enyo*, dado que los valores máximos se encuentran en la región del Cabo, así como en las zonas aledañas al Golfo de California.

Siguiendo los lineamientos del MER, se determinó que *C. enyo* es una especie Amenazada (A), lo cual coincide con su actual categoría de riesgo dentro de la NOM-059-SEMARNAT-2010 (SEMARNAT, 2019); por consiguiente, se sugiere que se mantenga este estatus de conservación. Esta categoría de riesgo nos indica que *C. enyo* es una especie cuyas poblaciones se encuentran en riesgo de desaparecer (a corto o mediano plazo) si los factores que las afectan siguen incidiendo negativamente sobre estas (Sánchez *et al.*, 2007). Si bien *C. enyo* pudiera presentar características de especies que se encuentran en riesgo de extinción tales como una distribución limitada dentro de México y vulnerabilidad biológica intrínseca alta (Sánchez *et al.*, 2007), no se

consideró que se encuentra en Peligro de Extinción (P) por tres razones principales: 1) Se determinó que el hábitat de la especie es limitante, más no hostil, dado que presenta una amplia distribución dentro de la PBC y a que no presenta especificidad por un solo tipo de hábitat (Carbajal-Márquez, 2013). Por lo tanto, es posible que los factores que pudieran estar afectando negativamente a la especie, tales como fenómenos estocásticos y crecimiento de las áreas urbanas, no inciden en toda su área de distribución, sino solo en una pequeña parte. 2) Se determinó que el factor antropogénico tiene un bajo impacto sobre *C. enyo*, debido a su poca abundancia poblacional, por lo tanto, se considera que las afectaciones negativas suceden en menor proporción si se compara con especies más abundantes en la península como *C. ruber* y *C. mitchellii*. 3) No se obtuvieron datos poblacionales como la densidad, estructura poblacional, tasas de crecimiento y supervivencia, los cuales ayudarían a determinar mejor el estado poblacional de *C. enyo* y, por lo tanto, determinar con mayor precisión su estado de conservación. Diversos autores resaltan la importancia de conocer el estado poblacional de las especies para determinar con mejor exactitud su riesgo de extinción (Platt y Thorbjarnarson, 2000; Lind *et al.*, 2005; Reading *et al.*, 2010; Böhm *et al.*, 2013). En este sentido, de manera precautoria, no se consideró confiable categorizar a *C. enyo* como una especie en Peligro de Extinción (P) sin un estudio poblacional previo.

Es importante mencionar que el EVS y el MER presentan diferencias en cuanto a la manera en que determinan la vulnerabilidad de las especies. El EVS que se utilizó para calcular la vulnerabilidad de *C. enyo* fue diseñado específicamente para los reptiles de México; por dicha razón, determina el riesgo de extinción con base en hábitos propios de los reptiles, es decir, si son especies venenosas y si son explotadas comercialmente (Wilson *et al.*, 2013). En cambio, el MER está diseñado para analizar el estado de conservación de cualquier especie del país, ya sean plantas, hongos o animales (Sánchez *et al.*, 2007); por lo tanto, se analizan diversos factores para determinar la vulnerabilidad intrínseca de las especies y el impacto de la actividad humana sobre los taxones. Por lo anteriormente mencionado, se observó una discrepancia en cuanto al grado de impacto del factor antropogénico sobre *C. enyo*; en el EVS fue alto mientras que en el MER se consideró bajo.

En ambos análisis, *C. enyo* presentó categorías consideradas de riesgo, lo cual difiere de otras evaluaciones de su estado de conservación como la publicada por la IUCN (Hollingsworth y Frost, 2007), en la cual se considera a la especie como “de menor preocupación”, principalmente porque determinan que su distribución es amplia y suponen un tamaño poblacional grande, por lo que indican que es poco probable que disminuya en corto plazo como para incluir a *C. enyo* en una categoría de riesgo (Hollingsworth y Frost, 2007). Sin embargo, es importante recalcar que, si tenemos en cuenta el mapa de distribución potencial de *C. enyo*, así como sus preferencias de hábitat, no todas las áreas dentro de su rango de distribución son idóneas para su presencia, lo que nos indica que su distribución en realidad es más estrecha. Lo anterior nos señala la importancia y urgencia de una reevaluación del estado de conservación de *C. enyo* siguiendo los lineamientos de la IUCN, puesto que la categoría Least Concern (LC) no es considerada como una categoría de riesgo (UICN, 2012a).

8.3 Análisis de rareza de *Crotalus enyo*

Con base en la metodología de Rabinowitz (1981) y las categorías de rareza de Birskis *et al.* (2019), se determinó que *Crotalus enyo* es una especie rara, presentando una categoría Alta Intermedia (AI) de rareza. Esto difiere de los resultados obtenidos por Birskis *et al.* (2019), en el cual se le asignó una categoría de rareza Baja Intermedia (BI), lo que nos señala que solo se le consideró rara en una de las tres variables que se analizan. Específicamente, Birskis *et al.* (2019) solo consideraron que *C. enyo* presenta una abundancia local baja, ya que no es una especie dominante dentro de su área de distribución. Sin embargo, en el presente trabajo se determinó que, si la comparamos con la superficie territorial de México, su distribución geográfica es pequeña, lo que le confiere otro valor de rareza a la especie. Se considera que los resultados obtenidos tanto en el EVS como en el MER de igual manera soportan los resultados obtenidos en el análisis de rareza de *C. enyo*.

Diversos autores (Van Jaarsveld *et al.*, 1998; Hartley y Kunin, 2003; Raphael y Molina, 2007; Birskis *et al.*, 2019) han recalcado la importancia de evaluar la rareza de las especies, esto como medida para determinar su estado de conservación. Las especies raras presentan características particulares que les confieren cierta vulnerabilidad a perturbaciones ambientales y al factor

antropogénico (Raphael y Molina, 2007; Birskis *et al.*, 2019). Por su parte, *C. enyo* es una especie vulnerable al ser endémica a la PBC, dentro de la cual tiene preferencia a ciertas regiones con características ambientales particulares, tales como temperaturas cálidas (18-26 °C), altas precipitaciones (~200 mm), bajas altitudes (≤ 943 msnm), vegetación de matorral sarcocaulé y selva baja caducifolia, así como climas áridos y semiáridos. Cabe resaltar que, aunque *C. enyo* se distribuye en diversas ecorregiones de la PBC, no es una especie localmente abundante, por lo tanto, su presencia en las ecorregiones es variable.

Para finalizar, se sugiere la inclusión de los análisis de rareza en las evaluaciones del estado de conservación de las especies. Esto como un criterio adicional para determinar cuáles son los taxones cuyas necesidades de conservación necesitan mayor atención.

9. CONCLUSIONES

La serpiente de cascabel de Baja California (*Crotalus enyo*) es una especie que prefiere temperaturas que fluctúan entre 18 – 26 °C, ya que el 48% de los registros de presencia se encuentran en ese rango de temperatura media anual.

Crotalus enyo no prefiere temperaturas extremas, debido a que no se registró la presencia de la especie en temperaturas menores a los 4 °C y mayores a los 40 °C.

El 61.5% de los registros de presencia se encuentran en regiones con un rango de precipitación media anual entre 70-250 mm y el 38.5% en precipitaciones mayores a los 250 mm, por lo que *C. enyo* es una especie que prefiere localidades donde las precipitaciones sean en promedio de 200 mm.

Crotalus enyo prefiere los matorrales sarcocaulales y sarco-crasicaules, así como las selvas bajas caducifolias del sur de la PBC.

El 54.3 % de los registros de presencia de *C. enyo* se encuentran en suelos regosoles eútricos con textura gruesa y un menor porcentaje se registró en suelos litosoles y yermosoles.

El 81.6 % de los registros de *C. enyo* se encuentra por debajo de los 500 msnm, siendo la mayor altitud registrada a los 943 msnm en las zonas aledañas a la Sierra La Laguna.

Las variables que contribuyen mayormente a predecir la ocurrencia de *C. enyo* son la estacionalidad de la precipitación, el tipo de vegetación, uso de suelo, y la precipitación del cuatrimestre más frío.

La probabilidad de ocurrencia de *C. enyo* aumenta cuando hay una mayor diferencia de precipitación entre estaciones del año.

La probabilidad de ocurrencia de *C. enyo* disminuye cuando la precipitación aumenta durante los meses más fríos del año.

El modelo de nicho ecológico elaborado con variables continuas y categóricas mostró los valores logísticos de presencia de la especie más homogéneos, lo que resalta la importancia de incluir variables categóricas en los modelos de nicho.

El valor del área bajo la curva (AUC) es un método útil para evaluar el rendimiento de los modelos de nicho ecológico y nos ayuda a seleccionar el mejor modelo.

Al norte de la PBC, el límite de la distribución potencial de *C. enyo* está marcado por las Sierras de San Pedro Mártir, Juárez, San Miguel y La Asamblea.

Crotalus enyo no se encuentra en las partes altas de las sierras de Baja California y Baja California Sur, lo que indica que su distribución no es continua a lo largo de la PBC.

La probabilidad de ocurrencia de *C. enyo* es mayor en la vertiente del Golfo de California, lo que sugiere su preferencia por climas cálidos.

El área que abarca desde el istmo de la Paz hacia el sur, en la región del Cabo, es la de mayor importancia para la conservación de *C. enyo*.

Las islas Cerralvo y Espíritu Santo son las de mayor importancia para la conservación de la especie.

Con base en el EVS, se catalogó a *C. enyo* como una especie que presenta vulnerabilidad media a la degradación ambiental.

Crotalus enyo se distribuye en 10 ecorregiones de la PBC, mayormente en la Costa Central del Golfo y en los Matorrales Tropicales.

Con base en el MER, se catalogó a *C. enyo* como una especie Amenazada (A), cuyas poblaciones se encuentran en riesgo de desaparecer a corto o mediano plazo.

Crotalus enyo es una especie rara; presenta una categoría de rareza Alta Intermedia (AI).

Crotalus enyo tiene una abundancia poblacional reducida y no es dominante en las localidades donde habita.

El análisis de rareza es un criterio importante para evaluar el estado de conservación de las especies.

9.1 Recomendaciones

9.1.1 Relevancia de la especie

Considerando su historia de vida y hábitos, la serpiente de cascabel de Baja California (*Crotalus enyo*) desempeña un papel fundamental en los ecosistemas donde se encuentra. Al ser depredador de diversas especies de roedores en la península, controlan las poblaciones de estos, lo que resulta beneficioso para la población humana. Además, *C. enyo* forma parte de la dieta de especies tales como el correcaminos norteño (*Geococcyx californianus*), el coyote (*Canis latrans*), el gato montés (*Lynx rufus*) y diversas aves rapaces (Klauber, 1972).

Cabe mencionar que su veneno podría ser aprovechado para la producción de medicamentos utilizados en el diagnóstico y tratamiento de distintas enfermedades que afectan a la población humana, así como en la producción de antídotos, útiles en caso de mordeduras de serpientes venenosas.

9.1.2 Recomendaciones para la conservación de la especie

Es necesario el desarrollo e implementación de campañas de educación ambiental, tanto en escuelas como en comunidades rurales y urbanas, esto con la finalidad de informar sobre la importancia que tienen las serpientes de cascabel en los ecosistemas donde habitan y sobre su

importancia para la población humana. El propósito principal de las campañas es que disminuya el número de serpientes que son sacrificadas por el temor que se les tiene y generar interés sobre la importancia ecológica que tiene la serpiente de cascabel de Baja California (*C. enyo*) para la región.

Se hace un énfasis en la necesidad de realizar estimaciones de la abundancia poblacional de *C. enyo*, así como de desarrollar investigaciones sobre su biología reproductiva. La obtención de esta información es esencial para poder determinar con mayor precisión su estado de conservación, así como implementar estrategias de conservación para la especie.

Se recomienda la evaluación del estado de conservación de *C. enyo* publicado por la IUCN, debido a que dicha evaluación no incluye a la especie en ninguna categoría de riesgo, mientras que las evaluaciones realizadas en el presente trabajo nos demuestran que la especie se encuentra amenazada.

Por último, se sugiere la conservación de áreas de vegetación natural que tengan conectividad entre ellas en la región del Cabo, ya que esta zona es donde hay numerosos desarrollos turísticos que modifican el uso del suelo actual, pudiendo provocar fragmentación de hábitat aislando a poblaciones de *C. enyo* y, con el tiempo, afectar su conservación y permanencia. Si bien en esta región se encuentra la Reserva de la Biósfera Sierra La Laguna, esta área protegida es refugio de *C. enyo* solo en las partes bajas de vegetación de selva baja caducifolia, por lo que la reserva por sí sola no es suficiente para la conservación de las poblaciones de *C. enyo* del sur de la península. Al igual esto puede ocurrir en el resto de las reservas si no se incluyen en los planes de manejo el monitoreo de especies y el manejo adecuado de los ecosistemas.

10. LITERATURA CITADA

- Aguirre, M.A., Bezaury, C.J., De la Cueva, H., March, M.I., Peters, R.E., Rojas, G.S. y Santos del Prado, G.K. (2010). *Islas de México, un recurso estratégico*. Instituto Nacional de Ecología (INE), The Nature Conservancy (TNC), Grupo de Ecología y Conservación de Islas, A.C. (GECI), Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), México.
- Anderson, R.P., Lew, D. y Peterson, A.T. (2003). Evaluating predictive models of species' distributions: Criteria for selecting optimal models. *Ecological Modelling*, 162: 211–232. doi: 10.1016/S0304-3800(02)00349-6.
- Arnaud, F.G. (2015). *Conservación de serpientes de cascabel de la península e islas del Golfo de California y del Pacífico*. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. Informe final SNIB-CONABIO, proyecto No. HK051, México, D. F.
- Ávila, N.D., Mendoza, G.D., Villarreal, O. y Serna, L.R. (2018). Uso y valor cultural de la herpetofauna en México: una revisión de las últimas dos décadas (1997–2017). *Acta Zoológica Mexicana* (nueva serie), 34: 1-15. doi: 10.21829/azm.2018.3412126.
- Beaman, K.R. y Grismer, L.L. (1994). Reptilia: Squamata: Serpentes. *Crotalus enyo* (Cope), Baja California rattlesnake. *Catalogue of American Amphibians and Reptiles*, 589: 1-6.
- Beaman, K.R. y Hayes, W.K. (2008). Rattlesnakes: research trends and annotated checklist. En: *The Biology of Rattlesnakes*. Ed. por Hayes, W.K, Beaman, K.R., Cardwell, M.D. y Bush, S.P. Loma Linda University Press, California, USA, pp. 5-16.
- Birskis, B.I., Alencar, L.R., Prado, P.I., Böhm, M. y Martins, M. (2019). Ecological and Conservation Correlates of Rarity in New World Pitvipers. *Diversity*. 11(9): 147. doi: 10.3390/d11090147.
- Böhm, M. *et al.* (2013). The conservation status of the world's reptiles. *Biological Conservation*, 157: 372-385. doi: 10.1016/j.biocon.2012.07.015.
- Brown, T. K., Lemm, J.M., Montagne, J., Tracey, J.A. y Alberts, A.C. (2008). Spatial ecology, habitat use and survivorship of resident and translocated Red Diamond Rattlesnakes (*Crotalus ruber*). En: *The Biology of Rattlesnakes*. Ed. por Hayes, W.K, Beaman, K.R., Cardwell, M.D. y Bush, S.P. Loma Linda University Press, California, USA, pp. 377-394.

- Calderón, M.R. (2002). *Ficha técnica de Crotalus durissus. Propuesta para la realización de 37 fichas biológicas de las especies de herpetofauna incluidas en la NOM-059 presentes en la Península de Yucatán*. Museo de Zoología, ECOSUR- Unidad Chetumal. Bases de datos SNIB-CONABIO. Proyecto No. W030. México, D.F.
- Campbell, J. y Lamar, W. (2004). *The Venomous Reptiles of the Western Hemisphere*. Cornell University Press, USA.
- Carbajal-Márquez, R. A. (2013). *Uso de Hábitat de Crotalus enyo (Serpentes: Viperidae) en la región del Cabo, Baja California Sur, México. Tesis (Maestría en Ciencias)*. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste. La Paz, México.
- Carbajal, M.R., Arnaud, G., Martins, M. y Quintero, D. G. (2016). Diet of *Crotalus enyo* (Serpentes: Viperidae) from the Baja California cape region, Mexico. *Acta Zoológica Mexicana*, 32(1): 45-48. doi: 10.21829/azm.2016.3201925.
- Carbajal, M.R. y Quintero, D.G. (2016). The herpetofauna of Aguascalientes, Mexico. *Revista Mexicana de Herpetología*, 2(1): 1-30.
- COL. (2021). *Catalogue of life*. Disponible en: <https://www.catalogueoflife.org/data/taxon/ZPBL> [consulta: 9 febrero 2021].
- Cruz, S.D., Muñoz, N.F., Mata, S.V., Johnson, J.D., García, P.E. y Wilson, L.D. (2017). The herpetofauna of Jalisco, Mexico: composition, distribution, and conservation status. *Mesoamerican Herpetology*, 4(1): 22-118.
- Equipo de desarrollo de QGIS. (2020). *Sistema de información geográfica QGIS*. Proyecto de Fundación Geoespacial de código abierto. Disponible en: <https://qgis.org>.
- Estrada-Hernández, C.G. (2010). *Distribución potencial de la serpiente de cascabel de Baja California Crotalus enyo. Tesis (Maestría en Ciencias)*. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste. La Paz, México.
- Ettling, J. y Schmidt, F. (2015). Introduction to Reptile Conservation. *Int. Zoo. Yb*, 49(1): 1-7. doi: 10.1111/izy.12099.
- Fielding, A.H. y Bell, J.F. (1997). A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models. *Environmental Conservation*, 24(1): 38-49. doi: 10.1017/S0376892997000088.
- Flores-Villela, O. A. (1980). *Reptiles de importancia económica en México. Tesis (Licenciatura en Biología)*. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.

- Flores, V.O., y García, V.U. (2014). Biodiversidad de reptiles en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85: 467-475. doi: 10.7550/rmb.43236.
- García, A.M., Luévano, E.J. y De la Cueva, H. (2017). La fauna nativa de México en riesgo y la NOM-059: ¿Están todos los que son y son todos los que están? *Acta Zoológica Mexicana*, 33(2): 188-198. doi: 10.21829/azm.2017.3321060.
- García, E. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (1998^a). *Climas (clasificación de Köppen, modificado por García)*. Escala 1:1000000. México.
- García, E. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (1998^b). "Precipitación Total Anual". Escala 1:1000000. México.
- Glaudas, X. y Rodríguez, R.J. (2011). A two-level problem: habitat selection in relation to prey abundance in an ambush predator, the speckled rattlesnake (*Crotalus mitchellii*). *Behaviour*, 148(14): 1491–1524. doi: 10.1163/156853912X623739.
- Goldberg, S.R. y Beaman, K.R. (2003). Reproduction in the Baja California Rattlesnake, *Crotalus enyo* (Serpentes: Viperidae). *Bull. Southern California Acad. Sci*, 102(1): 39-42.
- González, A.C., Garcillán, P.P. y Ezcurra, E. (2010). Ecorregiones de la Península de Baja California: Una Síntesis. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 87: 69-82.
- González, S.V., Johnson, J.D., García, P.E., Mata, S.V., De Santis, D.L. y Wilson, L.D. (2017). The herpetofauna of the Mexican Yucatan Peninsula: composition, distribution, and conservation status. *Mesoamerican Herpetology*, 4(2): 263-380.
- Grinnell, J. (1924). Geography and evolution. *Ecology*, 5: 225–229. doi: 10.2307/1929447.
- Grismer, L.L. (2002). *Amphibians and reptiles of Baja California including its Pacific islands and the islands in the Sea of Cortez*. University of California Press, USA.
- Halama, K.J., Malisch, A.J., Aspell, M., Rotenberry, J.T. y Allen, M.F. (2008). Modeling the Landscape Niche Characteristics of Red Diamond Rattlesnakes (*Crotalus ruber*): Implications for Biology and Conservation. En: *The Biology of Rattlesnakes*. Ed. por Hayes, W.K, Beaman, K.R., Cardwell, M.D. y Bush, S.P. Loma Linda University Press, California, USA, pp. 463-472.
- Hartley, S. y Kunin, W.E. (2003). Scale Dependency of Rarity, Extinction Risk, and Conservation Priority. *Conservation Biology*, 17(6): 1559–1570. doi: 10.1111/j.1523-1739.2003.00015.x.

- Hedges, S.B. y Poling, L.L. (1999). A molecular phylogeny of reptiles. *Science*, 283: 998-1001. doi: 10.1126/science.283.5404.998.
- Hollingsworth, B. y Frost, D.R. (2007). *Crotalus enyo*. The IUCN Red List of Threatened Species 2007. Disponible en: <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2007.RLTS.T64316A12765256.en> [consulta: 23 septiembre 2020].
- INEGI. (2017a). *Anuario estadístico y geográfico de Baja California*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Aguascalientes, México.
- INEGI. (2017b). *Anuario estadístico y geográfico de Baja California Sur*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Aguascalientes, México.
- INEGI. (2001). *Síntesis de Información Geográfica del estado de Baja California*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). Primera edición. Aguascalientes, México.
- INEGI. (1995). *Síntesis geográfica del estado de Baja California Sur*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). Aguascalientes, México.
- IUCN. (2020). *The IUCN Red List of Threatened Species. Version 2020-1*. Disponible en: <https://www.iucnredlist.org> [consulta: 23 septiembre 2020].
- Johnson, J.D., Wilson, L.D., Mata, S.V., García, P.E. y De Santis, D.L. (2017). The endemic of herpetofauna of Mexico: organisms of global significance in severe peril. *Mesoamerican Herpetology*, 4(3): 543-620.
- Johnson, J.D., Mata, S.V., García, P.E. y Wilson, L.D. (2015). The herpetofauna of Chiapas, Mexico: composition, distribution, and conservation. *Mesoamerican Herpetology*, 2(3): 271-329.
- Klauber, L.M. (1931). *Crotalus tigris* and *Crotalus enyo*, two little known rattlesnakes of the southwest. *Trans. San Diego Soc. Nat. Hist*, 6: 353-370. doi: 10.5962/bhl.part.11700.
- Klauber, L.M. (1972). *Rattlesnakes. Their habits, Life histories and Influence on Mankind*. University of California Press. Berkeley. USA.
- Lind, A.J., Welsh, H.H. y Tallmon, D.A. (2005). Garter snake population dynamics from a 16-year study: considerations for ecological monitoring. *Ecological Applications*, 15(1): 294-303. doi: 10.1890/03-5322.

- Liu, C., Berry, P., Dawson, T. y Pearson, R. (2005). Selecting thresholds of occurrence in the prediction of species distributions. *Ecography*, 28(3): 385-393. doi: 10.1111/j.0906-7590.2005.03957.x.
- Lovich, R.E., Grismer, L.L. y Danemann, G. (2009). Conservation status of the herpetofauna of Baja California, Mexico and associated islands in the Sea of Cortez and Pacific islands. *Herpetological Conservation and Biology*, 4(3): 358-378.
- Maderey, L.E. (1975). La humedad y la vegetación en la península de Baja California. *Investigaciones geográficas*, (6): 73-85.
- Manel, S., Williams, H. y Ormerod, S. (2002). Evaluating presence–absence models in ecology: the need to account for prevalence. *Journal of applied Ecology*, 38(5): 921-931. doi: 10.1046/j.1365-2664.2001.00647.x.
- Maritz, B., et al. (2016). Identifying global priorities for the conservation of vipers. *Biological Conservation*, 204: 94-102. doi: 10.1016/j.biocon.2016.05.004.
- Mata, S.V., Johnson, J.D., Wilson, L.D. y García, P.E. (2015). The herpetofauna of Oaxaca, Mexico: physiographic distribution, and conservation status. *Mesoamerican Herpetology*, 2(1): 5-62.
- Miranda, F. y Hernández, E.X. (1963). Fisiografía y vegetación. En: *Las zonas áridas del centro y noreste de México*. Edic. Inst. Mex. Rec. Nat. Renov. México, D. F., pp. 1-27.
- Moreno, R.G. (2004). ¿Por qué debemos conservar la biodiversidad? *Acta Granatense*, 3: 159-164.
- Mulcahy, D.G. y Macey, J.R. (2009). Vicariance and dispersal form a ring distribution in nightsnakes around the Gulf of California. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 53(2): 537–546. doi: 10.1016/j.ympev.2009.05.037.
- Murillo-Quero, R. (2009). *Uso de hábitat de la víbora de cascabel (Crotalus ruber) en un matorral xerófilo de La Paz, Baja California Sur, México. Tesis (Maestría en Ciencias)*. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste. La Paz, México.
- Murphy, R.W., Fu, J., Lathrop, A., Feltham, J.V. y Kovac, V. (2002a). Phylogeny of the rattlesnakes (*Crotalus* and *Sistrurus*) inferred from sequences of five mitochondrial DNA genes. En: *Biology of the Vipers*. Ed. por Schuett, G.W., Höggren, M., Douglas, M.E. y Greene, H.W. Eagle Mountain Publishing, Salt Lake City, Utah, USA, pp. 69-72.

- Murphy, R.W., Sánchez, P.F., Polis, G.A. y Albu, R.L. (2002b). New measurements of area and distance for islands in the Sea Cortes. En: *A New Island Biogeography of the Sea of Cortes*. Ed. por Case, T.J., Cody, M.L. y Ezcurra, E. Oxford University Press, pp. 447-464.
- Nevárez, D.M., Lazcano, D., García, P.E., Mata, S.V., Johnson, J.D. y Wilson, L.D. (2016). The herpetofauna of Nuevo León, Mexico: composition, distribution, and conservation. *Mesoamerican Herpetology*, 3(3): 557-638.
- Pañeda-Ramírez, E. (2019). *Ecología térmica de la serpiente de cascabel Crotalus ruber lucasensis*. Tesis (Maestría en Ciencias). Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste. La Paz, México.
- Papes, M. y Gaubert, P. (2007). Modelling ecological niches from low numbers of occurrences: assessment of the conservation status of poorly known viverrids (Mammalia, Carnivora) across two continents. *Diversity Distrib*, 13(6): 890-902. doi: 10.1111/j.1472-4642.2007.00392.x.
- Peterson, C.R., Gibson, A.R. y Dorcas, M.E. (1993). Snake thermal ecology: the causes and consequences of body-temperature variation. En: *Snakes: Ecology and Behavior*. Ed. por Seigel, R.A. y Collins, J.T. McGraw Hill, USA, pp. 241-314.
- Phillips, S.J., Anderson, R.P., Dudík, M., Schapire, R.E. y Blair, M.E. (2017). Opening the black box: an open-source release of Maxent. *Ecography*, 40(7): 887-893. doi: 10.1111/ecog.03049.
- Phillips, S.J., Anderson, R.P. y Schapire, R.E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190: 231-259. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026.
- Phillips, S.J., Dudík, M. y Schapire, R.E. (2020). *Maxent software for modeling species niches and distributions (Version 3.4.1)*. Disponible en: https://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/.
- Pianka, E.R. (2014). Rarity in Australian desert lizards. *Austral Ecology*, 39(2): 214-224. doi: 10.1111/aec.12061.
- Platt, S.G. y Thorbjarnarson, J.B. (2000). Population status and conservation of Morelet's crocodile, *Crocodylus moreletii*, in northern Belize. *Biological Conservation*, 96(1): 21-29. doi: 10.1016/S0006-3207(00)00039-2.
- Rabinowitz, D. (1981). Seven forms of rarity. En: *The Biological aspects of rare plant conservation*. Ed. por Synge, H. John Wiley & Sons, Inglaterra, pp. 205-217.

- Ramírez, B.A. y Hernández, I.X. (2004). Ficha técnica de *Crotalus basiliscus*. En: *Sistemática e historia natural de algunos anfibios y reptiles de México*. Ed. por Arizmendi, M.C. Facultad de Estudios Superiores Iztacala, Unidad de Biología, Tecnología y Prototipos (UBIPRO), Universidad Nacional Autónoma de México. Bases de datos SNIB-CONABIO. Proyecto W013. México, D.F.
- Ramírez, B.A. y Arizmendi, M.C. (2004). *Crotalus enyo*. *Sistemática e historia natural de algunos anfibios y reptiles de México*. Facultad de Estudios Superiores Iztacala, Unidad de Biología, Tecnología y Prototipos (UBIPRO), Universidad Nacional Autónoma de México. Bases de datos SNIB-CONABIO. Proyecto W013. México, D.F.
- Raphael, M.G. y Molina, R. (2007). *Conservation of Rare or Little-Known Species. Biological, Social and Economic Considerations*. Island Press, Washington D.C., USA.
- Reading, C.J. et al. (2010). Are snake populations in widespread decline? *Biology Letters*, 6(6): 777–780. doi: 10.1098/rsbl.2010.0373.
- Rebman, J.P. y Roberts, N.C. (2012). *Baja California Plant Field Guide*. San Diego: San Diego Natural History Museum. Tercera edición. California, USA.
- Rey, B.J. (2009). La rareza de las especies. *Investigación y ciencia*, (392): 62-69.
- Robinson, J.G. (2006). Conservation Biology and Real-World Conservation. *Conservation Biology*, 20(3): 658–669. doi: 10.1111/j.1523-1739.2006.00469.x.
- Rzedowski, J. (2006). *Vegetación de México*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). Primera edición digital. México.
- Salinas, Z.C., Leyva, A.C., Llunch, D.B. y Díaz, E.R. (1990). Distribución geográfica y variabilidad climática de los regímenes pluviómetros de Baja California Sur, México. *Atmósfera*, 3(3): 217-237.
- Santiago, L.F., Tena, G.A., Lagunas, M.V., Beltrán, L.F. y Ortega, A.R. (2014). Diagnosis of degraded areas and proposals for ecological restoration in Baja California Sur. En: *Conservation science in Mexico's northwest: Ecosystem status and trends in the Gulf of California*. Ed. por Wehncke, E.V., Lara, J.R., Álvarez, S.B. y Ezcurra, E. CONABIO, México, pp. 391-406.
- Sánchez, O., Medellín, R., Aldama, A., Goettsch, B., Soberón, J. y Tambutti, M. (2007). *Método de evaluación de riesgo de extinción de las especies silvestres en México (MER)*. Instituto Nacional de Ecología. Primera Edición. México, D.F.

- Santos, X., Brito, J.C., Sillero, N., Pleguezuelos, J.M., Llorente, G.A., Fahd, S. y Parellada, X. (2006). Inferring habitat-suitability areas with ecological modelling techniques and GIS: A contribution to assess the conservation status of *Vipera latastei*. *Biological Conservation*, 130(3): 416-425. doi: 10.1016/j.biocon.2006.01.003.
- SEMARNAT. (2016). *Informe de la situación del medio ambiente en México. Compendio de estadísticas ambientales. Indicadores clave, de desempeño ambiental y de crecimiento verde*. Edición 2015. SEMARNAT, México.
- SEMARNAT. (2019). Modificación del Anexo Normativo III, Lista de especies en riesgo de la Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010, Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo. En: *Diario Oficial de la Federación*, jueves 14 de noviembre de 2019, México, pp. 32-136.
- Shabani, F., Kumar, L. y Ahmadi, M. (2018). Assessing Accuracy Methods of Species Distribution Models: AUC, Specificity, Sensitivity and the True Skill Statistic. *Global Journal of Human-Social Science*, 18(1): 6-18.
- Soberón, J. y Townsend, A. (2005). Interpretation of models of fundamental ecological niches and species distributional areas. *Biodiversity Informatics*, 2: 1-10. doi: 10.17161/bi.v2i0.4.
- Soberón, J. y Nakamura, M. (2009). Niches and distributional areas: Concepts, methods, and assumptions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106: 19644-19650. doi: 10.1073/pnas.0901637106.
- Somodi, I., Lepesi, N. y Botta-Dukát, Z. (2017). Prevalence dependence in model goodness measures with special emphasis on true skill statistics. *Ecology and evolution*, 7: 863-872. doi: 10.1002/ece3.2654.
- Sutherland, W.J. *et al.* (2009). One Hundred Questions of Importance to the Conservation of Global Biological Diversity. *Conservation Biology*, 23(3): 557-567. doi: 10.1111/j.1523-1739.2009.01212.x.
- Taylor, E.N. (1999). Diet and reproductive biology of the Baja California rattlesnake, *Crotalus enyo*. *Program Book and Abstracts, Joint Meetings of ASIH, HL, and SSAR*, 217.
- Taylor, E.N. (2001). Diet of the Baja California Rattlesnake, *Crotalus enyo* (Viperidae). *Copeia*, 2001(2): 553-555. doi: 10.1643/0045-8511(2001)001[0553:DOTBCR]2.0.CO;2.

- Tay, Z.J., Díaz, S.J., Sánchez, V.J., Ruiz, S.D. y Castillo, L. (2002). Serpientes y reptiles de importancia médica en México. *Rev. Fac. Med. UNAM*, 45(5): 212-219.
- Terán, J.S., García, P.E., Mata, S.V., Johnson, J.D. y Wilson, L.D. (2016). The herpetofauna of Tamaulipas, Mexico: composition, distribution, and conservation status. *Mesoamerican Herpetology*, 3(1): 42-113.
- Thompson, J.N. (1997). Conserving Interaction Biodiversity. En: *The Ecological Basis of Conservation*. Ed. por Pickett, S.T. et al. Springer, Boston, USA, pp. 285-293.
- Troyo, D.E. et al. (2014). Análisis de la sequía y desertificación mediante índices de aridez y estimación de la brecha hídrica en Baja California Sur, noroeste de México. *Investigaciones geográficas*, (85): 66-81.
- Tryon, B.W. y Radcliffe, C.W. (1977). Reproduction in captive lower California rattlesnakes, *Crotalus enyo enyo* (Cope). *Herpetol. Rev.*, 8: 34-6.
- Uetz, P. (2019). *Species Statistics*. The Reptile Database. Disponible en: <http://www.reptile-database.org/db-info/SpeciesStat.html> [consulta: 17 septiembre 2020].
- Uetz, P. (2020). *The Reptile Database*. Disponible en: <http://www.reptile-database.org> [consulta: 28 septiembre 2020].
- UICN. (2012a). *Categorías y Criterios de la Lista Roja de la UICN: Versión 3.1*. UICN, Gland, Suiza.
- UICN. (2012b). *Directrices para el uso de los Criterios de la Lista Roja de la UICN a nivel regional y nacional: Versión 4.0*. UICN, Gland, Suiza.
- Urbina, C.J. y Flores, V.O. (2010). Ecological-Niche Modeling and Prioritization of Conservation-Area Networks for Mexican Herpetofauna. *Conservation Biology*, 24(4): 1031–1041. doi: 10.1111/j.1523-1739.2009.01432.x.
- Van Jaarsveld, A.S. et al. (1998). Biodiversity Assessment and Conservation Strategies. *Science*, 279(5359): 2106–2108. doi: 10.1126/science.279.5359.2106.
- Varea, A. (2004). Iniciativas para conservar la biodiversidad. *Universitas*, (4): 7-44. doi: 10.17163/uni.n4.2004.01.
- Vitt, L.J. y Caldwell, J.P. (2014). *Herpetology: An Introductory Biology of Amphibians and Reptiles*. Academic Press. Cuarta Edición. Londres, Reino Unido.
- Wilson, L.D., Mata, S.V. y Johnson, J.D. (2013). A conservation reassessment of the reptiles of Mexico based on the EVS measure. *Amphibian & Reptile Conservation*, 7(1): 1-47.

- WorldClim. (2020). *Global climate and weather data*. WorldClim. Disponible en: <https://www.worldclim.org/data/index.html> [consulta: 5 noviembre 2020].
- Woolrich, P.G., García, P.E., DeSantis, D.L., Johnson, J.D., Mata, S.V. y Wilson, L.D. (2017). The herpetofauna of Puebla, Mexico: composition, distribution, and conservation status. *Mesoamerican Herpetology*, 4(4): 790-884.
- Woolrich, P.G., Ponce, C.P., Loc, B.J., Ramírez, S.J., Mata, S.V., Johnson, J.D., García, P.E. y Wilson, L.D. (2016). The herpetofauna of Nayarit, Mexico: composition, distribution, and conservation status. *Mesoamerican Herpetology*, 3(2): 372-448.