

El Colegio de la Frontera Sur

Distribución e idoneidad del hábitat de *Crocodylus acutus*,
Crocodylus moreletii y cocodrilos híbridos en Quintana Roo,

México

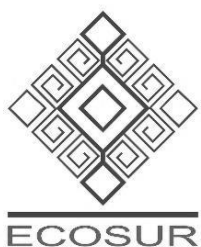
TESIS

Presentada como requisito parcial para optar al grado de
Maestra en Ciencias en Recursos Naturales y Desarrollo Rural

Por

Wendy Deyanira Sánchez Méndez

2016



El Colegio de la Frontera Sur

Chetumal, Quintana Roo, 30 de Junio de 2016.

Las personas abajo firmantes, miembros del jurado examinador de:

Wendy Deyanira Sánchez Méndez

hacemos constar que hemos revisado y aprobado la tesis titulada

Distribución e idoneidad del hábitat de *Crocodylus acutus*, *Crocodylus moreletii* y cocodrilos híbridos en Quintana Roo, México.

para obtener el grado de **Maestro (a) en Ciencias en Recursos Naturales y Desarrollo Rural**

	Nombre	Firma
Director/a	Dr. J. Rogelio Cedeño Vázquez	_____
Asesor/a	Dr. David González Solís	_____
Asesor/a	M. C. Holger Weissenberger	_____
Sinodal adicional	MTI Janneth A. Padilla Saldivar	_____
Sinodal adicional	Dr. Pablo Jesús Ramírez Barajas	_____
Sinodal suplente	M. C. Alejandro Antonio Vela Pelaez	_____

A mi madre, que ha sido el motor para conseguir este logro.

A mi abuela (Q. E. P. D.), que nos dejó sus mejores enseñanzas en el corazón.

Mis dos grandes maestras de vida.

AGRADECIMIENTOS

A todas las personas, instituciones y dependencias que colaboraron directa o indirectamente en la realización de esta investigación.

A El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR) y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el financiamiento otorgado mediante la asignación de la beca (488518); y apoyo otorgado para la Maestría en Recursos Naturales y Desarrollo Rural, así como en la realización de este trabajo de investigación.

A los Dres. José Rogelio Cedeño, David González Solís y al M. en C. Holger Weissenberger, por ser parte de mi consejo tutelar, darme la oportunidad de aprender y trabajar con ellos., por sus sugerencias, apoyo, paciencia y dedicación para guiarme en el uso de diferentes herramientas de trabajo que me seguirán siendo de utilidad a lo largo de mi carrera profesional.

A mi familia, que ha sido un pilar fundamental en mi camino, pero sobre todo a mi madre, que me ha alentado a seguir mis sueños, cumplir las metas que me he impuesto y que siempre está a mi lado a pesar de mis errores. A mis hermanas y sobrinos que siempre están ahí para darme una sonrisa cuando la necesito.

A mi novio, que siempre me alienta a nunca dejar de luchar, me apoya y acompaña a cada instante, gracias por ser parte de mi vida.

A mis amigos, que me acompañan y me animan, que jamás se han olvidado de mí, por mucho que yo me olvide de ellos y del mundo exterior.

A todos los que me han visto reír, sufrir, llorar y enojarme a lo largo de este proceso de aprendizaje, gracias por estar a mi lado compartiendo esta experiencia.

ÍNDICE

RESUMEN.....	i
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO II. ARTÍCULO.....	5
Distribución potencial y zonas de hibridación de cocodrilos en el Caribe mexicano	
MATERIALES Y MÉTODOS	8
RESULTADOS	10
DISCUSIÓN	12
AGRADECIMIENTOS	17
RESUMEN	18
REFERENCIAS.....	19
CUADROS Y FIGURAS	25
CAPÍTULO III. CONCLUSIONES	31
LITERATURA CITADA	34

RESUMEN

La distribución de las especies depende de las variables ambientales que conforman el hábitat, por lo tanto, es necesario conocer las variables que influyen en cada especie, para entender sus requerimientos e identificar áreas con mayor idoneidad para cada una. Estas áreas son susceptibles a ser afectadas por factores antrópicos, lo que disminuye su potencial para albergar especies a largo plazo. Siendo los cocodrilos especies sombrilla, es necesario considerar que al tener hábitats más restringidos, también los tendrán las especies que comparten sus hábitats. En este estudio, se elaboró el mapa de distribución actual y modelos de distribución potencial para *Crocodylus acutus*, *C. moreletii* y sus híbridos en Quintana Roo. También se consideró la idoneidad de sus hábitats como referencia para analizar el posible impacto de las actividades antrópicas en la conservación de sus poblaciones. Los resultados sugieren que ambas especies se distribuyen en áreas sujetas a presión humana. *Crocodylus acutus* se encuentra restringido a la franja costera, donde los desarrollos turísticos y urbanos son una amenaza para sus zonas de anidación. Para *C. moreletii*, que habita principalmente cuerpos de agua dulce, el riesgo se presenta por bioacumulación de sustancias tóxicas por el uso de agroquímicos en la cuenca del Río Hondo. Los híbridos, que se han encontrado también en la franja costera, representan la pérdida de la pureza genética para ambas especies en la zona de simpatría, pero ofrecen una oportunidad para el estudio de las interacciones interespecíficas y los procesos evolutivos.

Palabras clave: simpatría, Caribe mexicano, cocodrilo americano, cocodrilo de Morelet, híbridos, presión antrópica.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

Los cocodrilos (Orden Crocodylia) son un recurso natural de alto valor en los hábitats donde se distribuyen, debido a que se ubican en los niveles superiores dentro de las redes tróficas (Hernández-Jiménez, 2013). Tienen un papel importante como depredadores tope en el control del tamaño poblacional de sus presas (Cedeño-Vázquez, 2011), y en el reciclaje de nutrientes, al incorporar sus desechos al medio acuático (Platt et al., 2010). Así mismo, contribuyen en el mantenimiento de las condiciones hídricas al abrir canales que comunican a los cuerpos de agua entre sí (Sánchez-Herrera et al., 2011). Durante la época de sequía construyen pozas circulares en zonas pantanosas, que son el único refugio de algunas especies de la fauna acuática (Cedeño-Vázquez, 2011).

Para el ser humano, los cocodrilos históricamente han tenido importancia médica, alimenticia, cultural, social, religiosa y, sobre todo, económica, por el aprovechamiento de su piel (Cedeño-Vázquez, 2011). En México, debido a la cacería sin control durante el periodo de 1930 a 1960, sus poblaciones disminuyeron drásticamente, hasta casi desaparecer (Ross, 1998), por lo que fueron agregados a la lista roja de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN). Por la implementación de leyes de protección y la reducción de la caza ilegal, las poblaciones han entrado en un periodo de recuperación (Cedeño-Vázquez et al., 2008), y ya no se consideran en peligro inmediato de desaparecer, sin embargo, aún están incluidas dentro de las regulaciones para protección de especies. El cocodrilo americano se encuentra en el Apéndice I de CITES (excepto las poblaciones de Cuba, que se encuentran en el Apéndice II), mientras que el cocodrilo de Morelet está en el Apéndice II de CITES (excepto las poblaciones de Guatemala, que permanecen en el Apéndice I) (CITES, 2015). Ambas especies se encuentran como “sujetas a protección especial” dentro de la NOM-059-SEMARNAT-2010 (SEMARNAT, 2010).

Las dos especies de cocodrilos que se distribuyen en México, y que habitan históricamente el territorio de Quintana Roo son: *Crocodylus acutus* (cocodrilo americano) y *C. moreletii* (cocodrilo de Morelet) (Álvarez del Toro, 1974). De igual manera, existen cocodrilos híbridos que han sido identificados recientemente mediante marcadores moleculares (Cedeño-Vázquez et al., 2008). *Crocodylus acutus* se localiza principalmente en zonas costeras con agua salobre, como las secciones de agua salada de los ríos, lagunas costeras y manglares (Charruau et al., 2010). En Quintana Roo, habita en cuerpos de agua salina y salobre de la franja costera, incluyendo cayos, atolones e islas (Cedeño-Vázquez, 2011). Los adultos pueden alcanzar una longitud total (LT) de 6 m, y una edad reproductiva a los 1.8 m LT. La temporada reproductiva ocurre desde finales de marzo hasta mediados de julio. Las hembras excavan nidos en la arena, cerca de cuerpos de agua, y depositan entre 20 y 60 huevos que son incubados en un periodo de 70 a 80 días (Thorbjarnarson, 2010).

Por su parte, *C. moreletii* ocupa principalmente cuerpos de agua dulce, pero también se le ha encontrado en aguas salobres o salinas (Platt et al., 2010). Con frecuencia, se encuentra en aguas poco profundas, con poca corriente o estancadas, que pueden ser claras o turbias, y tener abundante vegetación acuática enraizada o flotante (Barrios-Quiroz y Casas-Andreu, 2011). En Quintana Roo habita en la mayoría de los cuerpos de agua continentales: lagunas interiores, cenotes, aguadas, canales, pequeñas pozas en sabanas y en el Río Hondo (Cedeño-Vázquez, 2011). Los adultos alcanzan hasta 3.5 m y su madurez reproductiva a los 1.5 m LT (Charruau et al., 2010). La temporada reproductiva abarca desde mediados de junio hasta septiembre. El nido es construido con restos vegetales en forma de montículo, donde la hembra deposita entre 15 y 40 huevos. Estos son incubados de 75 a 90 días con el calor producido por la descomposición de la materia orgánica (Cedeño-Vázquez, 2011).

Debido a la similitud en los requerimientos de hábitat de *C. acutus* y *C. moreletii*, ambas especies llegan a compartir zonas de distribución, por lo que se consideran especies simpátricas en los humedales costeros de la parte oriental de la Península de Yucatán (Cedeño-Vázquez, 2011), desde Ría Lagartos, Yucatán, hasta Belice (Cedeño-Vázquez

et al., 2008). La identificación de las dos especies en zonas de simpatría es difícil; sin embargo, gracias a la implementación del uso de diferentes técnicas moleculares, como ADN mitocondrial y microsatélites de ADN nuclear, ha sido posible identificar a los individuos de cada especie, y confirmar la presencia de híbridos (Cedeño-Vázquez et al., 2008). La existencia de individuos híbridos implica conocer en detalle sus límites de distribución, las interacciones interespecíficas y la repartición del hábitat.

La forma en que entendemos los requerimientos de cada especie será diferente de acuerdo con la escala espacial de hábitat que se aborde (Saab, 1999). En este caso, se considera una escala regional, donde el establecimiento de una especie se verá influenciado por los tipos de clima, vegetación, altitud (Pérez-Solano et al., 2012), cercanía a los asentamientos humanos y características del hábitat (Hernández-Jiménez, 2013), como el primer paso para entender la situación actual de los cocodrilos en su hábitat natural.

Conocer la distribución espacial de un organismo, así como los factores que influyen sobre ellos, es de gran utilidad cuando se trata de estudiar una especie o sus poblaciones (Carrillo-Reyna, et al., 2015); esto nos permite señalar las áreas con mayor valor ecológico para cada una (Serey et al., 2011). Se considera que los patrones más obvios de la distribución de los organismos ocurren en respuesta a las variaciones del ambiente (Phillips y Schapire, 2006), por ejemplo, en hábitats terrestres, estos patrones son determinados por el clima, temperatura, humedad, tipos de suelo y fisiología del animal (Delfín-Alfonso y Gallina, 2007; Brown y Lomolino, 1998). Por tanto, un hábitat idóneo o de alta calidad es aquel que presenta una combinación de recursos y condiciones ambientales adecuados que permite a los individuos de una especie (o población) sobrevivir y reproducirse de la manera más adecuada (Carrillo-Reyna, 2013; Morrison et al., 1998).

Considerando lo mencionado anteriormente, se plantearon las siguientes preguntas de investigación: (1) ¿Cuáles son las áreas con las condiciones idóneas para la

permanencia de *Crocodylus acutus* y *C. moreletii*?, (2) ¿De qué manera están siendo afectados los hábitats de *C. acutus* y *C. moreletii* en el estado de Quintana Roo por las actividades antrópicas? (3) ¿Cuáles son las posibles causas de la hibridación?, (4) ¿Cuál es la distribución de los cocodrilos híbridos? y (5)¿Cuáles son las repercusiones de la existencia de híbridos?

La hipótesis de este estudio propone que el hábitat más idóneo para *C. acutus* y *C. moreletii* se encuentra únicamente dentro de áreas naturales protegidas, lejos de fuertes presiones antrópicas.

CAPÍTULO II. ARTÍCULO

1
2 **Distribución potencial y zonas de hibridación de cocodrilos en el Caribe mexicano**

3 **Potential distribution and hybrid zones of crocodiles in the Mexican Caribbean**

4

5 Wendy D. Sánchez-Méndez¹, J. Rogelio Cedeño-Vázquez¹, Holger Weissenberger² &
6 David González-Solis¹

7 ¹ Departamento de Sistemática y Ecología acuática. El Colegio de la Frontera Sur,
8 Unidad Chetumal. C.P. 77014. Chetumal, Quintana Roo, México.
9 wdsanchez@ecosur.edu.mx, dgonzale@ecosur.mx

10 ² Laboratorio de Análisis de Información Geográfica y Estadística (LAIGE). El Colegio
11 de la Frontera Sur, Unidad Chetumal. C.P. 77014. Chetumal, Quintana Roo, México.
12 holgerweissen@ecosur.mx

13 *Autor para correspondencia: rcedenov@ecosur.mx

14

15 **Abstract:** The knowledge about current and potential distribution of species requires
16 information about environmental variables and physical variations of habitat. Potential
17 distribution models were generated for the American crocodile (*Crocodylus acutus*),
18 Morelet's crocodile (*C. moreletii*) and hybrid crocodiles in the Mexican Caribbean. The
19 distribution maps obtained were compared with the location of roads, human
20 settlements and land use. The results suggest that impact of human activities are a
21 threat to the habitat of crocodile. The American crocodile occupies a small area,
22 restricted to the coastal strip, where the urban and tourist developments represent the
23 major threat to the permanence and integrity of its habitat. For Morelet's crocodile, the
24 risk arises in the long term by overexposure to pesticides and fertilizers, due to the fact
25 that some of its populations inhabit near agricultural areas. Although hybrid crocodiles
26 might affect the genetic integrity of both species in the sympatric area, they represent an

27 opportunity to study the interspecific interactions, considering the role of hybridization in
28 natural evolutionary processes.

29 **Key words:** Habitat suitability, Maxent, distribution, American crocodile, Morelet's
30 crocodile, hybrid crocodiles.

31

32 Total de palabras: 6647

33

34 El Caribe mexicano comprende la zona costera y continental del estado de Quintana
35 Roo, el cual enfrenta cambios acelerados, principalmente por el incremento de las
36 actividades productivas, desarrollo urbano y turístico (Pérez-Villegas y Carrascal, 2000;
37 INEGI, 2011). Esto genera que la biodiversidad de esta región se encuentre amenazada
38 por la elevada pérdida y degradación del hábitat (Calderón-Mandujano & Cedeño-
39 Vázquez, 2011; Cedeño-Vázquez, 2011), lo que modifica los patrones de distribución
40 de las especies. Las variables ambientales, así como la distribución espacial de las
41 especies, son de gran utilidad para conocer las áreas con mayor valor de idoneidad
42 (Serey et al., 2007). Esto es, al conocer las características ambientales más adecuadas
43 para las especies, se pueden identificar los sitios donde es más probable su presencia
44 (Phillips, et al., 2006; Watling, et al., 2012), sobre todo cuando las actividades humanas
45 provocan cambios constantes a los ambientes naturales.

46 En el Caribe mexicano se distribuyen de natural las dos especies de cocodrilo que
47 habitan en México: el cocodrilo americano (*Crocodylus acutus*) y el cocodrilo de Morelet
48 (*C. moreletii*) (Álvarez del Toro, 1974; Ross, 1998). Debido a la existencia de zonas de
49 simpatria entre ambas especies, en la parte oriental de la Península de Yucatán (Fig.
50 1), se encuentran individuos híbridos producto de la cruce entre ambas especies, que
51 han sido identificados mediante estudios genéticos (Cedeño-Vázquez et al., 2008;
52 Rodríguez et al., 2008; Machkour-M'Rabet et al., 2009). Los cocodrilos habitan
53 ambientes, tanto terrestres como acuáticos (Cupul-Magaña, 2012), y juegan un papel
54 importante en el control poblacional de sus presas, por su rol como depredadores tope
55 en las redes tróficas (Hernández-Jiménez, 2009; Cedeño-Vázquez, 2011), así como en

56 el reciclaje de nutrientes (Ross, 1998; Platt et al., 2008). El uso de los cocodrilos como
57 indicadores ambientales parte del supuesto de que son considerados especies
58 sombrilla, debido a que su respuesta al cambio es representativa a la de las otras
59 especies en la comunidad (Isasi-Catalá, 2011).

60 En México se desató una cacería sin control de cocodrilos durante el periodo de 1930 a
61 1960, por el elevado valor económico de su piel en el mercado. Esto, provocó que las
62 poblaciones de ambas especies disminuyeran drásticamente hasta casi desaparecer
63 (Ross, 1998), por lo que fueron agregadas a la lista roja de la Unión Internacional
64 para la Conservación de la Naturaleza (UICN). Sin embargo, mediante la
65 implementación de leyes de protección y el cese de la caza ilegal, las poblaciones han
66 entrado en un periodo de recuperación (Ross, 1998), y aunque ya no se consideran en
67 peligro inmediato de desaparecer, aún están incluidas dentro de las regulaciones para
68 protección de especies. El cocodrilo americano se encuentra en el Apéndice I (excepto
69 las poblaciones de Cuba, que se encuentran en el Apéndice II) y el cocodrilo de Morelet
70 en el Apéndice II (excepto las poblaciones de Guatemala, que se encuentran en el
71 Apéndice I) de la CITES (CITES, 2015); ambas especies se encuentran sujetas a
72 protección especial en la NOM-059-SEMARNAT-2010 (SEMARNAT, 2010).

73 Considerando la importancia ecológica de los cocodrilos, es necesario conocer las
74 variables que favorecen su presencia, entender la situación actual de sus hábitats, así
75 como generar modelos de distribución potencial que ayuden a elaborar propuestas para
76 la conservación y manejo de sus poblaciones (López-Luna et al., 2011; Hernández
77 Jiménez, 2013). Por lo tanto, el objetivo de este trabajo fue identificar las áreas con
78 mayor idoneidad de hábitat en el Caribe mexicano para el cocodrilo americano, el
79 cocodrilo de Morelet y los cocodrilos híbridos, mediante modelos de distribución
80 potencial, a partir de los registros de su distribución actual. Así como también,
81 determinar las variables ambientales relevantes que influyen en su distribución y las
82 posibles afectaciones que ocasionan las actividades humanas sobre los ambientes
83 naturales del Caribe mexicano en los que habitan las especies de cocodrilos, y las
84 posibles repercusiones por la presencia de cocodrilos híbridos en el área de simpatria.

85

86

87
88

89 **Distribución actual:** A partir de 838 registros georreferenciados y 15 registros
90 reportados por Machkour-M'Rabet et al. (2009) (Cuadro 1), se elaboró el mapa de
91 distribución actual para el cocodrilo americano ($n= 131$), el cocodrilo de Morelet ($n=$
92 712), los cocodrilos híbridos ($n= 10$) y el área de simpatria para ambas especies en el
93 Caribe mexicano.

94 **Distribución potencial:** Los modelos de distribución potencial se obtuvieron a partir de
95 747 registros georreferenciados: 98 del cocodrilo americano, 639 del cocodrilo de
96 Morelet, y 10 individuos híbridos. Para ello, se utilizó el software de máxima entropía
97 (Maxent) propuesto por Phillips et al. (2006). Maxent utiliza registros espaciales de
98 presencia de una especie en una región geográfica de interés y variables ambientales,
99 las cuales permiten identificar algunas de las características del ambiente que son más
100 adecuadas para su presencia, sobrevivencia y distribución, es decir, sitios con hábitat
101 más idóneo para las especies (Phillips, et al., 2006; Narkis-Morales, 2012; Watling, et
102 al., 2012). La información de las variables ambientales de cada punto de presencia es
103 extrapolada al espacio geográfico deseado, para determinar una distribución potencial
104 en el área asignada (Carrillo-Reyna, 2013).

105 Dentro de la plataforma de Maxent, se eligió la opción “remover registros de
106 duplicados”, para eliminar los registros que se localicen en el mismo pixel. Para evaluar
107 la ejecución del modelo, se eligió la opción “porcentaje de prueba al azar”, la cual
108 separa un porcentaje de datos para crear un modelo paralelo de validación. Para esto,
109 se utilizó 25% de datos de prueba tomados al azar, los cuales se referirán como “datos
110 de validación”, con 15 réplicas. Debido a que el programa Maxent considera
111 únicamente registros dentro de la superficie continental, los puntos de muestreo que se
112 localizaban fuera de esta área (en cuerpos de agua como el río hondo o el Mar Caribe),
113 fueron trasladados al punto continental más cercano para que pueda ser considerado
114 por Maxent; esto se realizó mediante la herramienta “snap” del software Arcgis..

115 La sensibilidad del modelo se determinó usando la información de las curvas ROC
116 (Receiver Operating Characteristic) . El AUC (Area Under the Curve), permite comparar

117 la ejecución del modelo con los datos de entrenamiento y validación, así como probar
118 su rendimiento y capacidad discriminatoria. Un valor de AUC= 0.5 indica que la
119 ejecución del modelo no es mejor que el azar, mientras que valores cercanos a 1
120 indican un mejor rendimiento del modelo (Watling et al., 2012). También, se realizó un
121 análisis Jackknife para los datos de cada especie (cocodrilo americano y cocodrilo de
122 Morelet), así como de los individuos híbridos, el cual excluye una variable en cada
123 interacción y crea un modelo con las variables remanentes. Así mismo, crea un modelo
124 usando cada variable de manera aislada (Carrillo-Reyna, 2013), para obtener las
125 variables que más afectan la distribución de cada especie.

126
127 **Variables ambientales:** Se utilizaron 19 capas con información bioclimática (Cuadro 2),
128 proporcionadas por la página web de Bioclim/WorldClim
129 (<http://www.worldclim.org/bioclim>), las cuales se encuentran en formato raster con
130 resolución de pixel de 1 km². Las variables bioclimáticas son derivadas de valores
131 mensuales de temperatura y precipitación, para generar mayor aplicación biológica.
132 Estas variables pueden representar tendencias anuales (ej. temperatura media o
133 precipitación anual), estacionales (ej. rango anual de precipitación) y factores
134 ambientales limitantes (ej. temperatura o precipitación del mes más frío), con el fin de
135 identificar las variables biológicamente más significativas para modelos de hábitat
136 (Hijmans et al., 2005; Carrillo-Reyna et al., 2015). Maxent proporciona el modelo
137 resultante en formato raster a una resolución de pixel de 1 km² (Phillips et al., 2006),
138 con valores 0 a 1 que representan la idoneidad del hábitat para cada especie, según las
139 condiciones ambientales. En el proceso de generación del modelo de distribución
140 potencial, la información de las variables ambientales de cada punto de presencia fue
141 extrapolada al espacio geográfico del área de estudio

142 Debe considerarse que el sitio donde se encuentra al individuo, no es por si solo el
143 hábitat, sino que incluye también la ribera, vegetación existente, disponibilidad de
144 alimento y presiones por actividades humanas (Sigler, 1998). Es por ello que para
145 contrastar la distribución potencial de ambas especies de cocodrilos y sus híbridos, se
146 utilizó la carta de uso de suelo y vegetación de la Serie V para Quintana Roo INEGI

147 (2013), así como información de carreteras y asentamientos humanos, para considerar
148 la mayoría de factores que puedan afectar su distribución.

149
150 **Validación del modelo:** Para la validación de los mapas de distribución potencial
151 generados por Maxent, se consideraron 15 registros del cocodrilo americano de la Isla
152 de Cozumel (Machkour-M'Rabet et al., 2009); mientras que para el cocodrilo de
153 Morelet, se realizaron muestreos nocturnos en dos cuerpos de agua con distribución
154 potencial (de acuerdo con las características consideradas por el modelo) en el sur de
155 Quintana Roo. Se lograron documentar 28 avistamientos (24 en laguna Noh Bec y
156 cuatro en Laguna Negra), de acuerdo con el método propuesto por Sigler et al. (2011).

157

158

159 RESULTADOS

160

161 **Distribución actual:** De acuerdo a los registros utilizados y los mapas generados (Fig.
162 2), se encontró que la distribución actual del cocodrilo americano abarcala porción
163 costera de Quintana Roo: el norte de la Bahía de Chetumal, Península de Xcalak,
164 Mahahual, Bahía de la Ascensión en la Reserva de la Biosfera Sian Ka'an (RBSK),
165 Puerto Morelos, Cancún, Laguna Yalahau en el Área de Protección de Flora y Fauna
166 Yum Balam (APFFYB), el atolón de la Reserva de la Biosfera Banco Chinchorro (RBBC)
167 e Isla Cozumel. El cocodrilo de Morelet ocupa la superficie continental, se tienen
168 registros de su presencia en lagunas interiores (Ocom, Valle Hermoso, Chichankanab y
169 Cobá) y en la ribera del Río Hondo, así también en algunas áreas de simpatria donde
170 habitan el cocodrilo americano y los híbridos, como Bahía de Chetumal, Península de
171 Xcalak, norte de Mahahual, Puerto Morelos y APFFYB.

172

173 **Variables ambientales:** Para el cocodrilo americano, con los datos de entrenamiento,
174 se obtuvo un valor de AUC= 0.969, y con validación de 0.963 (desviación estándar
175 [DE]= 0.020), por lo que el modelo de distribución de la especie se considera

176 satisfactorio. Las principales variables ambientales que determinan su distribución
177 fueron la temperatura media del rango diurno (°C) (media del mes [max temp-min
178 temp]) y la precipitación del trimestre más lluvioso (mm). Estas variables contribuyeron
179 con un 75% para predecir la presencia de la especie; no obstante, la primera contribuyó
180 con una mayor ganancia en la generación del modelo (50%). Sin embargo, la
181 precipitación del trimestre más lluvioso resultó ser una variable irremplazable, ya que al
182 ser eliminada, contribuye a que el mayor ajuste del modelo se pierda, debido a que
183 parece tener la mayoría de la información que no está presente en el resto de las
184 variables.

185 En el caso del cocodrilo de Morelet, se obtuvo un valor de AUC= 0.939, y con la
186 validación fue 0.913 (DE= 0.020), considerando satisfactorio al modelo de distribución
187 de la especie. Las principales variables ambientales que determinaron la distribución
188 fueron la precipitación del trimestre más lluvioso, precipitación del mes más lluvioso,
189 precipitación anual y temperatura media del rango diurno. Estas variables contribuyeron
190 con un 70%. No obstante, la variable que, por si sola, contribuyó con una mayor
191 ganancia en la generación del modelo, fue la precipitación del trimestre más lluvioso
192 (20%). Por otra parte, la precipitación del trimestre más lluvioso resultó ser una variable
193 irremplazable.

194 Para los híbridos, se obtuvo un valor de AUC= 0.924, y con la validación 0.810 (DE=
195 0.082), con lo que el modelo se considera satisfactorio. El rango de temperatura anual
196 es la variable que determina su distribución, al contribuir con un 50% y al aportar, por si
197 sola, una mayor ganancia en la generación del modelo. Sin embargo, la temperatura
198 media del trimestre más frío resultó ser una variable irremplazable.

199
200 **Distribución potencial e idoneidad del hábitat** Con relación a los valores de
201 idoneidad del hábitat, en el caso del cocodrilo americano, éstos se encuentran entre
202 0.000175-0.984376, con distribución potencial más idónea en las zonas costeras de la
203 parte norte (Puerto Morelos, Cancún, Cozumel y APFFYB), centro (parte norte de la
204 RBSK), sur (Península de Xcalak, Mahahual y RBBC). La parte norte de la Bahía de
205 Chetumal, parte central de la RBSK y algunas áreas del Río Hondo tienen valores de
206 idoneidad de medios a bajos (Fig. 3a). Para el cocodrilo de Morelet, los valores de

207 idoneidad oscilaron entre 0.000059 y 0.941449, con distribución potencial en la parte
208 sur (Bahía de Chetumal, Río Hondo y zonas aledañas), lagunas interiores del sur,
209 centro y norte del Estado (Valle Hermoso, Chichankanab, Cobá y Ocom), así como
210 lagunas costeras de la porción norte (Puerto Morelos, Cancún y APFFYB) (Fig. 3b). En
211 el caso de los híbridos, los valores de idoneidad se encuentran entre 0.013007-
212 0.932235, con distribución potencial en toda la porción costera de Quintana Roo;
213 principalmente, en la parte norte de la Bahía de Chetumal, Península de Xcalak,
214 Mahahual, parte sur de la RBSK, norte de la Riviera Maya, Cancún, zonas al este de la
215 APFFYB, RBBC y Cozumel. La parte central del estado (norte de la RBSK y sur de la
216 Riviera Maya), el sur del Río Hondo y parte del área continental de Quintana Roo tienen
217 una idoneidad media (Fig. 3c).

218 Al comparar las áreas con distribución potencial y hábitat más idóneo, con la red
219 carretera, asentamientos humanos y sitios con cambios de uso de suelo, se puede
220 apreciar un traslape entre ellas. En el caso del cocodrilo americano, su presencia se
221 relaciona con las grandes zonas urbanas en expansión en la franja costera (ej. Tulum,
222 Playa del Carmen, Puerto Morelos y Cancún) y donde existe un número importante de
223 asentamientos humanos y carreteras (Figs. 3a y 4a). Para el cocodrilo de Morelet, el
224 hábitat más idóneo se ubica en la porción sur (cuenca del Río Hondo) y coincide con
225 grandes extensiones de uso agrícola (Figs. 3b y 4b, c).

226

227

DISCUSIÓN

228

229 La distribución del cocodrilo americano propuesta por Lee (1996) considera únicamente
230 su presencia en Cozumel y la RBBC, mientras que Köhler (2008) la señala en la franja
231 costera de Quintana Roo sin registros en Cozumel y la RBBC. Considerando la
232 distribución propuesta en la literatura antes mencionada y los resultados obtenidos en
233 este trabajo, se propone que la distribución actual del cocodrilo americano puede
234 abarcar la zona costera de Quintana Roo, desde el norte de la Bahía de Chetumal
235 hasta el norte del estado. En el caso de la distribución del cocodrilo de Morelet, tanto
236 Lee (1996) como Köhler (2008) no consideran la parte norte de Quintana Roo, debido a

237 la falta de registros. Sin embargo, en este trabajo si se tienen registros de esta especie
238 para dicha zona. Por tanto, se propone que la distribución actual para esta especie
239 incluye la parte continental del estado. La distribución actual de ambas especies en
240 Quintana Roo comprende una amplia zona de simpatría en la porción costera, lo que
241 concuerda con lo reportado por Calderón-Mandujano et al. (2009) y Cedeño-Vázquez et
242 al. (2011), aunque en ambos casos la zona de simpatría se extiende hasta Belice.

243 En relación con las variables ambientales, la distribución potencial para las dos
244 especies de cocodrilos y sus híbridos, se encuentra históricamente relacionada con las
245 variaciones de precipitación y temperatura; como los factores que afectan la distribución
246 de los cocodrilos. (Casas-Andreu, 1997; Escobedo-Galván, 2004). Los contrastes de
247 temperatura están directamente relacionados con su reproducción (Bull & Charnov,
248 1989), ya que no solo el sexo está determinado por la temperatura, sino también tiene
249 efectos sobre el desarrollo embrionario, peso, longitud al nacer, crecimiento posterior y
250 sobrevivencia de las crías (Campos, 1993; Casas-Andreu, 1997; Escobedo-Galván,
251 2004). La precipitación durante el periodo de incubación es crucial para la eclosión de
252 los huevos, si en el lugar donde está el nido se anega total o parcialmente la cámara de
253 incubación, la humedad excesiva limita la respiración y provoca temperaturas no
254 favorables para la incubación y eclosión (Soberón, et al., 2002).

255 Considerando la distribución potencial para el cocodrilo americano en el Caribe
256 mexicano, sus áreas de mayor idoneidad se restringen a algunas porciones de la franja
257 costera (Fig. 3a), donde ocupan cuerpos de agua con salinidad elevada (30-61 ppm). Al
258 comparar la distribución actual con la potencial, se observa que las áreas con hábitats
259 idóneos son limitadas, lo que aumenta el riesgo de la pérdida de su hábitat.

260 La distribución actual y potencial de los cocodrilos en el área de estudio, se encuentra
261 dentro de la Bioregión de Yucatán e incluye zonas que forman parte de las Unidades de
262 Conservación para Cocodrilo (CCU por sus siglas en inglés), propuestas por
263 Thorbjarnarson et al. (2006). Dicha bioregión cuenta con el mayor porcentaje de CCU
264 dentro de áreas naturales protegidas, así como una elevada calidad del hábitat, que
265 incluye sitios adecuados para anidación, alta conectividad y potencial para su uso
266 sustentable. Respecto al problema por destrucción del hábitat en Quintana Roo,

267 Thorbjarnarson et al. (2006) identificaron la zona sur y centro con un nivel moderado,
268 mientras que la zona norte quedó sin categorizar, debido a que no se disponía de
269 información suficiente para definir la magnitud del problema. Actualmente, se puede
270 notar que la zona norte (Tulum-Cancún) tiene una mayor presión por cambios de uso
271 de suelo, debido al crecimiento de la mancha urbana y actividades antrópicas, como el
272 incremento de desarrollos turísticos sin planeación sobre áreas de manglar y
273 destrucción de playas arenosas usadas por los cocodrilos para anidación (Pérez-
274 Villegas & Carrascal, 2000; Cedeño-Vázquez, 2011). La transformación de la franja
275 costera conlleva al deterioro de los ambientes críticos para la especie, lo que disminuye
276 las características idóneas en el hábitat para su persistencia y limita el intercambio de
277 individuos entre las poblaciones por la creación de barreras, lo cual podría ser un factor
278 que promueva el proceso de hibridación (Hekkala et al., 2015).

279 Para el cocodrilo de Morelet, tanto la distribución actual, como la potencial, se
280 encuentran más extendidas, en comparación con las del cocodrilo americano. Esto se
281 debe a que esta especie, además de ocupar sitios con agua salobre, también habita en
282 cuerpos de agua dulce interiores (alejados de la costa). Es importante señalar que el
283 cocodrilo de Morelet podría habitar incluso en Cozumel si llegara a introducirse (dado
284 que así lo muestra el modelo de distribución potencial, Fig. 3B), lo cual podría tener
285 repercusiones para las poblaciones puras del cocodrilo americano presentes en la isla
286 (Machkour-M'Rabet et al., 2009; Cedeño-Vázquez, 2011).

287 La mayoría de los registros para cocodrilo de Morelet provienen del Río Hondo, cuerpo
288 de agua fronterizo entre México y Belice, que se encuentra bajo fuerte presión por la
289 presencia de asentamientos humanos (Kauffer & Villanueva, 2011) y actividad agrícola
290 extensiva, con uso de agroquímicos en ambos países (Buenfil-Rojas et al., 2015). Se
291 tiene información sobre la acumulación de metales pesados en el cuerpo de los
292 cocodrilos de este cuerpo de agua (Buenfil-Rojas et al., 2015), lo cual puede afectar la
293 permanencia de la especie en el largo plazo, por el efecto del cambio y contaminación
294 de su hábitat.

295 González-Trujillo et al. (2014) señalan que la reducción de las poblaciones del cocodrilo
296 de Morelet en la región de Catemaco, Veracruz, está asociada a la remoción de la

297 vegetación a los costados de las carreteras. La reducción de vegetación está
298 ocurriendo en Quintana Roo, debido al crecimiento de los desarrollos turísticos y los
299 cambio de uso de suelo que retiran la cubierta vegetal usada por las especies. La
300 constante presión que ejerce el ser humano en el ambiente, por los cambios de uso del
301 suelo (aumento en el número de carreteras, caminos y asentamientos humanos) y la
302 remoción de gran parte de la cobertura vegetal, afecta la calidad y viabilidad del hábitat
303 de los cocodrilos (Thorbjarnarson et al., 2006).

304 Escobedo-Galván & González-Salazar (2011) generaron modelos de distribución
305 potencial para el cocodrilo americano, cocodrilo de Morelet y organismos híbridos en
306 México; sin embargo, para el caso de Quintana Roo, no se diferencian zonas en los
307 modelos de distribución, lo cual puede ser resultado del programa utilizado (GARP), la
308 escala y la extensión del área de estudio. Dichos autores consideran prácticamente
309 todo el Estado como zona de distribución para las dos especies y sus híbridos. Sus
310 resultados difieren de lo obtenido en este estudio mediante Maxent, que identificó áreas
311 de idoneidad de menor cobertura para cada especie. Considerando la distribución
312 actual y potencial de ambas especies de cocodrilos, se presentan zonas de simpatria,
313 en las cuales se han registrado los individuos híbridos. Este patrón de distribución tiene
314 una tendencia similar al reportado por Hekkala et al. (2015) para Belice, donde también
315 se identifican extensas zonas de simpatria y cocodrilos híbridos. Hekkala et al. (2015)
316 consideran a la salinidad como un factor crucial en la distribución de los cocodrilos,
317 sobre todo en el caso de los híbridos, que fueron encontrados exclusivamente en
318 cuerpos de agua con baja salinidad (0.003 ppm). Sin embargo, los híbridos identificados
319 en Quintana Roo fueron registrados en cuerpos de agua con gradientes de salinidad
320 entre 2 y 52 ppm (Bahía de Chetumal, Península de Xcalak, RBSK, Laguna Nichupté y
321 APFFYB). Se ha observado que los individuos híbridos poseen mayor tolerancia a
322 condiciones ambientales extremas, como salinidad alta (52ppm) , además crecen
323 rápidamente y alcanzan tallas más grandes, debido al vigor híbrido (Cedeño-Vázquez et
324 al., 2008), lo que les permite ocupar ambientes más variables.

325 La hibridación ha sido considerada como una amenaza para la integridad genética de
326 las especies y los objetivos de conservación (Rutledge et al., 2016), debido a que se

327 pueden alterar las estructuras comunitarias existentes y aumentar la susceptibilidad de
328 las especies a patógenos y parásitos (Jackiw et al., 2015). Es importante considerar
329 que el área que Maxent marca como potencial para híbridos, es muy similar a la del
330 cocodrilo americano. Esto implica un riesgo para su conservación a largo plazo, ya que
331 la desaparición del cocodrilo americano por introgresión genética es posible (Rodríguez
332 et al., 2008), debido al reducido número de poblaciones puras (Machkour-M'Rabet et
333 al., 2009; Escobedo-Galván & González-Salazar, 2011).

334 Otro punto a considerar sobre la hibridación es la rapidez con que los seres humanos
335 alteran los hábitats naturales (Jackiw et al., 2015; Rutledge et al., 2016), ya que podrían
336 estar modificando la trayectoria evolutiva de las especies (Grigg y Kirshner, 2015) e
337 incentivar el proceso de hibridación (Rutledge et al., 2016) mediante la formación de
338 barreras no naturales y la destrucción del hábitat. En el caso del cocodrilo americano, la
339 transformación de la franja costera, por la actividad turística (Cedeño-Vázquez, 2011;
340 INEGI, 2011), reduce las características idóneas del hábitat para la especie y la obliga a
341 entrar a zonas donde es más probable que se encuentre con el cocodrilo de Morelet
342 (Hekkala et al., 2015). Sin embargo, la hibridación es un fenómeno natural que se
343 presenta comúnmente en especies hermanas con distribución simpátrica (Hekkala et
344 al., 2015; Sefc & Koblmuller, 2015). Además, forma parte de los procesos de
345 adaptación y evolución de las especies, ya que juega un papel importante en la
346 especiación de las poblaciones (Rutledge et al., 2016), con lo cual se puede aumentar
347 la diversidad genética y ser usada como fuente para la restauración de especies en
348 caso de ser necesario. Por tanto, resulta importante la conservación de los individuos
349 híbridos, a pesar de sus orígenes (Jackiw et al., 2015), pero sin dejar de mantener la
350 integridad genética de las especies (Cedeño-Vázquez et al., 2008).

351 Entender la presión que el factor antrópico ejerce sobre la estabilidad de las
352 poblaciones de cocodrilos en el Caribe mexicano es un reto que debe considerarse. Los
353 ambientes en los que se encuentran los cocodrilos son áreas de primordial importancia
354 para la conservación, son áreas ricas en diversidad biológica sin embargo, su
355 resguardo se complica al mismo tiempo son objeto de desarrollo económico (ej. pesca

356 comercial y deportiva, turismo, zonas residenciales) (Thorbjarnarson et al., 2006;
357 Cedeño-Vázquez et al., 2008).

358 La protección de especies o ecosistemas en grandes áreas geográficas es cada vez
359 menos factible, por lo que este trabajo ayuda a focalizar las áreas centrales de
360 distribución y así concentrar los esfuerzos de conservación en áreas críticas. En este
361 sentido, es necesario ampliar el monitoreo de las poblaciones de cocodrilos en áreas
362 con pocos registros, pero con alta idoneidad del hábitat, como la RBSK, Cozumel,
363 APFFYB y lagunas interiores, de las que se tienen pocos registros. Lo anterior aportará
364 un mejor conocimiento del estado de sus poblaciones. Por otra parte, es necesario
365 considerar la distribución de los híbridos, como una oportunidad para el estudio de las
366 interacciones conductuales entre las especies y documentar los mecanismos que
367 promueven el proceso de hibridación.

368

369

370

AGRADECIMIENTOS

371

372 A Fernando González Ávila, Mauricio González Jáuregui y Carlos E. Tuz Catzin por su
373 apoyo en las salidas de campo. A Gerardo Daniel López Montejo, Responsable del
374 Centro de Información Geográfica de la Universidad de Quintana Roo por su asesoría
375 durante la elaboración de los mapas. Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología
376 (CONACyT) por la beca No. 488518 otorgada a W.D.S.M. para realizar la Maestría en
377 Ciencias en Recursos Naturales y Desarrollo Rural en el posgrado de ECOSUR. El
378 trabajo de campo estuvo respaldado por los permisos otorgados por la Dirección
379 General de Vida Silvestre de la Secretaría de Medio Ambiente y Recurso Naturales
380 (Oficios Núms. SGPA/DGVS/09769/14, 03124/15).

381

382

383

384

385

RESUMEN

386

387 Para conocer la distribución actual y potencial de las especies, es necesario disponer
388 de información sobre las variables ambientales y variaciones físicas en el hábitat.
389 Mediante el software Maxent, se generaron modelos de distribución potencial para el
390 cocodrilo americano (*Crocodylus acutus*), el cocodrilo de Morelet (*C. moreletii*) y los
391 híbridos producto de la cruce entre ambas especies en el Caribe mexicano. Los mapas
392 de distribución obtenidos se compararon con la ubicación de carreteras, asentamientos
393 humanos y uso de suelo. Los resultados sugieren que el impacto de las actividades
394 humanas es una amenaza para el hábitat idóneo de los cocodrilos. El cocodrilo
395 americano ocupa un área más reducida y restringida de la franja costera, donde los
396 desarrollos turísticos y urbanos son una amenaza para la permanencia e integridad de
397 su hábitat. Para el cocodrilo de Morelet, el riesgo se presenta en el largo plazo por la
398 exposición prolongada a plaguicidas y fertilizantes, debido a que algunas de sus
399 poblaciones habitan cerca de zonas agrícolas. Aunque los cocodrilos híbridos afectan la
400 integridad genética de ambas especies en la zona de simpatría, también son una
401 oportunidad para el estudio de las interacciones entre las especies, considerando el
402 papel de la hibridación en los procesos evolutivos naturales.

403

404

405

406

407

408

409

410

411

412
413
414
415
416
417
418
419
420
421
422
423
424
425
426
427
428
429
430
431
432
433
434
435
436
437
438
439
440
441

REFERENCIAS

Álvarez del Toro, M. (1974). Los Crocodylia en México (Estudio comparativo). Ediciones del Instituto Mexicano de Recursos Naturales Renovables, A.C. 70 pp.

Bull, J. J., & Charnov, E. L. (1989). Enigmatic reptilian sex ratios. *Evolution*, 43(7): 1561-1566.

Buenfil-Rojas, A. M., Álvarez-Legorreta, T., & Cedeño-Vázquez, J. R. (2015). Metals and metallothioneins in Morelet's crocodile (*Crocodylus moreletii*) from a transboundary river between Mexico and Belize. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 68: 265-273.

Calderón-Mandujano, R. R., & Cedeño-Vázquez, J. R. (2011). Reptiles. Pp. 247-251. En: Pozo, C. (ed.). Riqueza Biológica de Quintana Roo. Un análisis para su conservación, Tomo 2. El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR), Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), Gobierno del Estado de Quintana Roo y Programa de Pequeñas Donaciones (PPD). México, D. F.

Calderón-Mandujano, R. R., Cedeño-Vázquez, J. R., & Bahena-Basave, H. (2009). Herpetofauna: análisis y perspectivas. Pp. 148-158. En: Espinoza-Ávalos, J., Islebe, G. A., & Hernández-Arana, H. A. (eds.). El sistema ecológico de la bahía de Chetumal/Corozal: costa occidental del Mar Caribe.. El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR). México,

Campos, Z. (1993). Effect of habitat on survival of eggs and sex ratio of hatchlings of *Caiman crocodilus yacare* in the Pantanal, Brazil. *Journal of Herpetology*, 27(2): 127-132.

Carrillo-Reyna, N. L. (2013). Abundancia relativa, selección de hábitat y distribución potencial del tapir centroamericano en la Península de Yucatán: estudio a escala regional. Tesis de Maestría, El Colegio de la Frontera Sur, San Cristóbal de las Casas, Chiapas, México.

- 442 Carrillo-Reyna, N., Weissenberger, H., & Reyna-Hurtado, R. (2015). Distribución
443 potencial del tapir centroamericano en la Península de Yucatán. *Therya*, 6(3):
444 575-596.
- 445 Casas-Andreu, G. (1997). Dispersión o vicarianza en la distribución de *Crocodylus* en el
446 continente Americano. Memorias de la 4ª reunión regional del grupo de
447 especialistas en cocodrilos de América Latina y el Caribe.
- 448 Cedeño-Vázquez, J. R. (2011). El cocodrilo, recurso milenario. Pp. 234-240. En: Pozo,
449 C. et al. (ed). Riqueza Biológica de Quintana Roo. Un análisis para su
450 conservación, Tomo I. El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR), Comisión
451 Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), Gobierno
452 del Estado de Quintana Roo y Programa de Pequeñas Donaciones (PPD).
- 453 Cedeño-Vázquez, J. R., Rodríguez, D., Calmé, S., Ross, J. P., Densmore III, L. D., &
454 Thorbjarnarson, J. B. (2008). Hybridization between *Crocodylus acutus* and
455 *Crocodylus moreletii* in the Yucatan Peninsula: I. Evidence from mitochondrial
456 DNA and morphology. *Journal of Experimental Zoology*, 309A: 661-673.
- 457 Cedeño-Vázquez, J. R., Villegas, A., & Sigler-Moreno, L. (2011). Guía gráfica para la
458 identificación morfológica de *Crocodylus moreletii* y posibles híbridos con *C.*
459 *acutus*. Pp. 203-218. En: Sánchez-Herrera, O. G. et al. (eds.). Programa de
460 monitoreo del cocodrilo de pantano (*Crocodylus moreletii*) México-Belice-
461 Guatemala. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
462 México.
- 463 CITES (Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de
464 Fauna y Flora Silvestres). (2015). Appendices I, II and III. Valid from 29 Mayo
465 2016. Available from <https://cites.org/esp/app/appendices.php>
- 466 Cupul-Magaña, F. G. (2012). Registro de los movimientos de dos ejemplares de
467 cocodrilo americano, *Crocodylus acutus*, en Puerto Vallarta, Jalisco, México.
468 Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras, 41(2): 479-483.
- 469 Escobedo-Galván, A. H. (2004). Avances en el conocimiento y estado actual de
470 conservación del cocodrilo de Tumbes (*Crocodylus acutus* Cuvier, 1807). *Revista*
471 *Peruana de Biología*, Lima, 11(2): 203-208.

- 472 Escobedo-Galván, A. H., & González-Salazar, C. (2011). Aplicando modelos de nicho
473 ecológico para predecir áreas potenciales de hibridación entre *Crocodylus acutus*
474 y *C. moreletii*. *Quehacer Científico en Chiapas*, 1(11): 27-35.
- 475 González-Trujillo, R., Méndez-Alonzo, R., Arroyo-Rodríguez, V., Vega, E., González-
476 Romero, A., & Reynoso, V. H. (2014). Vegetation cover and road density as
477 indicators of habitat suitability for the Morelet's crocodile. *Journal of Herpetology*,
478 48(2): 188-194.
- 479 Grigg, G., & Kirshner, D. (2015). Hybridization and introgression. Pp. 529-531. En:
480 Grigg, G. et al (ed.). *Biology and evolution of crocodylians*. 649 pp.
- 481 Hekkala, E. R., Platt, S. G., Thorbjarnarson, J. B., Rainwater, T. R., Tessler, M.,
482 Cunningham, S. W., Twomey, C., & Amato, G. (2015). Integrating molecular,
483 phenotypic and environmental data to elucidate patterns of crocodile hybridization
484 in Belize. *Royal Society of Open Science*, 2: 150409.
- 485 Hernández-Jiménez, R. (2009). Características poblacionales del *Crocodylus moreletii*
486 en el estero Chacoaco, Tuxpan, Ver. Tesis de Licenciatura. Universidad
487 Veracruzana. Tuxpan, Veracruz, México.
- 488 Hernández-Jiménez, R. (2013). El cocodrilo de pantano *Crocodylus moreletii* como
489 elemento estratégico para la conservación de los ENPs Manglar de Tumulco y
490 Ciénega del Fuerte. Tesis de Maestría, Universidad Veracruzana, Tuxpan,
491 Veracruz, México.
- 492 Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G., & Jarvis, A. (2005). Very high
493 resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International*
494 *Journal of Climatology* 25: 1965-1978.
- 495 INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). (2011). Censo de
496 población y vivienda 2010. Panorama sociodemográfico de Quintana Roo.
497 México. 54 pp.
- 498 INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). (2013). Cartas de
499 uso de suelo y vegetación. Consultado en:

500 <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/usosuelo/> el 25 de Noviembre de
501 2015.

502 Isasi-Catalá, E. (2011). Los conceptos de las especies indicadoras, paraguas, banderas
503 y claves: su uso y abuso en ecología de la conservación. *Interciencia*, 36(6): 31-
504 38.

505 Jackiw, R. N., Mandil, G., & Hager, H. A. (2015). A framework to guide the conservation
506 of species hybrids based on ethical and ecological considerations. *Conservation
507 Biology*, 29(4): 1040-1051.

508 Kauffer, M., & Villanueva, C. L. (2011). Retos de la gestión de una cuenca construida: la
509 península de Yucatán en México. *Aqua-lac*, 3: 81-91.

510 Köhler, G. (2008). *Reptiles of Central America*. 2ª ed. Germany. Offenbach Herpeton
511 Verlag. 400 pp.

512 Lee, J. L. (1996). *The amphibians and reptiles of the Yucatán Peninsula*. 1ª ed. New
513 York. Cornell University Press. 500 pp.

514 López-Luna, M. A., Hidalgo-Mihart, M. G., & Aguirre-León, G. (2011). Descripción de los
515 nidos del cocodrilo de pantano *Crocodylus moreletii* en un paisaje urbanizado en
516 el sureste de México. *Acta Zoológica Mexicana*, 27(1): 1-16.

517 Machkour-M'Rabet, S., Hénaut, Y., Charruau, P., Gevrey, M., Winterton, P., & Legal, L.
518 (2009). Between introgression events and fragmentation, islands are the last
519 refuge for the American crocodile in Caribbean Mexico. *Marine Biology*, 156(6):
520 1321-1333.

521 Narkis-Morales, S. (2012). Modelos de distribución de especies: Software Maxent y sus
522 implicaciones en conservación. *Revista de Conservación Ambiental*, sección de
523 notas y comentarios, 2(1): 1-5.

524 Pérez-Villegas, G. & Carrascal, E. (2000). El desarrollo turístico en Cancún, Quintana
525 Roo y sus consecuencias sobre la cubierta vegetal. *Investigaciones Geográficas*,
526 43: 145-166.

527 Phillips, S., Anderson, R., & Schapire, R. (2006). Maximum entropy modeling of species
528 geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190: 231-259.

529 Platt, S. G., Rainwater, T. R., Thorbjarnarson, J. B., & McMurry, S. T. (2008).
530 Reproductive dynamics of a tropical freshwater crocodilian: Morelet's crocodile in
531 northern Belize. *Journal of Zoology*, 275(2): 177-189.

532 Rodríguez, D., Cedeño-Vázquez, J. R., Michael, R., Forstner, J., & Densmore III, L.
533 (2008). Hybridization between *Crocodylus acutus* and *Crocodylus moreletii* in the
534 Yucatan Peninsula: II. Evidence from microsatellites. *Journal of Experimental*
535 *Zoology*, 309A: 674-686.

536 Ross, J. P. (1998). Crocodiles. Status, survey and conservation action plan. 2ND Edition.
537 IUCN/SSC Crocodile Specialist Group. IUCN, Gland, Switzerland and
538 Cambridge, UK.

539 Rutledge, L. Y., Devillard, S., Hohenlohe, P. A., & White, B. N. (2016). Considering all
540 the evidence: a reply to Sefc and Koblmuller (2016). *Biological Letters*, 12:
541 20151009.

542 SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2010). Norma
543 Oficial Mexicana Nom-059-SEMARNAT-2010, Protección ambiental-especies
544 nativas de México de flora y fauna silvestres-categorías de riesgo y
545 especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-lista de especies en
546 riesgo. Diario oficial de la federación.

547 Sefc, K. M., & Koblmuller, S. (2015). Ancient hybrid origin of the eastern wolf not yet off
548 the table: a comment on Rutledge et al. (2015). *Biological Letters*, 12: 20150834.

549 Serey, I., Barrera, F., & Moreira, D. (2007). Biodiversidad en ecosistemas y paisajes a
550 escala regional. Pp. 95-109. En: Serey, I., et al. (eds.). Libro rojo de la región de
551 O'Higgins. Corporación Nacional Forestal-Universidad de Chile.

552 Sigler, L. (1998). Monitoreo y captura de cocodrilianos silvestres. Manuscrito
553 presentado en: 1er Curso Taller para el proyecto de Conservación, Manejo y
554 Aprovechamiento Sustentable de los Cocodrilianos en México. Pantanos de
555 Centla, Tabasco.

556 Sigler, L., Cedeño-Vázquez, J. R., & Cupul-Magaña, F. G. (2011). Método de detección
557 visual nocturno (DVN). Pp. 105-127. En: Sánchez-Herrera, O. et al. (eds.).
558 Programa de monitoreo del cocodrilo de pantano (*Crocodylus moreletii*) México-

559 Belice-Guatemala. México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la
560 Biodiversidad.

561 Soberón, R. R., Tabet, M. A., & Álvarez, V. B. (2002). Nidificación del cocodrilo
562 americano (*Crocodylus acutus* Cuvier) en el refugio de fauna “Monte
563 Cabaniguan”, Cuba. *Conservaçãoe Manejo de Jacarés e Crocodilos da América*
564 *Latina*, 2, 135-156.

565 Thorbjarnarson, J., Mazzotii, F., Sanderson, E., Buitrago, F., Lazcano, M., Minkowski,
566 K., Muñoz, M., Ponce, P., Sigler, L., Soberon, R., Trelancia, A. M., & Velasco, A.
567 (2006). Regional habitat conservation priorities for the American crocodile.
568 *Biological Conservation*, 128: 25-36.

569 Watling, J., Brandt, L., Mazzotti, F., & Rimañach, S. (2012). Use and interpretation of
570 climate envelope models: A practical guide. University of Florida, 43 pp.

571

572

573

574

575

576

577

578

579

580

581

582

583

584

585

586

587

588

589

590

591

592

CUADROS Y FIGURAS

593

594

CUADRO 1.

595 Registros utilizados (n= 853) para obtener la distribución actual del cocodrilo

596 americano, cocodrilo de Morelet y cocodrilos híbridos en Quintana Roo.

597

598

TABLE 1

599 Records (n= 853) for the current distribution of American crocodile, Morelet's

600 crocodile and hybrid crocodiles.

601

Localidad	Cocodrilo americano	Cocodrilo de Morelet	Híbridos	Intervalo de salinidad (ppp) (promedio)
Área de Protección de Flora y Fauna Yum Balam (APFFYB)	34	23	1	1.2-52 (29.60)
Cancún y Puerto Morelos	8	10	1	31-39 (36.55)
Isla Cozumel	15	0	0	50
Reserva de la Biosfera Sian Ka'an (RBSK)	17	18	3	1.4-40
Lagunas interiores (Ocom, Valle Hermoso, Chichankanab, Cobá)	0	127	0	0.26
Lagunas costeras al norte de Mahahual	9	6	1	16-34 (21.17)
Península de Xcalak	43	10	3	20.6
Reserva de la Biosfera Banco Chinchorro (RBBC)	1	0	0	30-61 (48.90)
Bahía de Chetumal	4	37	1	2-12 (8.61)
Río Hondo	0	481	0	0.63-0.69
Total	131	712	10	

602

603

604

605

606

Cuadro 2.

607 Capas de información climática utilizadas para elaborar los modelos de distribución
608 potencial para *C. acutus*, *C. moreletii* y cocodrilos híbridos en el Caribe mexicano.

609

610

Table 2

611 Climate information used to develop models of potential distribution for *C. acutus*, *C.*
612 *moreletii* and hybrids crocodiles in the Mexican Caribbean.

613

Clave	Descripción de la variable
Bio_1	Temperatura media anual
Bio_2	Media del rango diario (media del mes (maxtemp-mintemp))
Bio_3	Isoterma (Bio_2/Bio_7)*(100)
Bio_4	Temperatura estacional
Bio_5	Temperatura máxima del mes más cálido
Bio_6	Temperatura mínima del mes más frío
Bio_7	Rango de temperatura anual (Bio_5 -Bio_6)
Bio_8	Temperatura media del trimestre más lluvioso
Bio_9	Temperatura media del trimestre más seco
Bio_10	Temperatura media del trimestre más cálido
Bio_11	Temperatura media del trimestre más húmedo
Bio_12	Precipitación anual
Bio_13	Precipitación del mes más lluvioso
Bio_14	Precipitación del mes más seco
Bio_15	Coficiente de variación de las precipitaciones estacionales
Bio_16	Precipitación del trimestre más lluvioso
Bio_17	Precipitación del trimestre más seco
Bio_18	Precipitación del trimestre más cálido
Bio_19	Precipitación del trimestre más frío

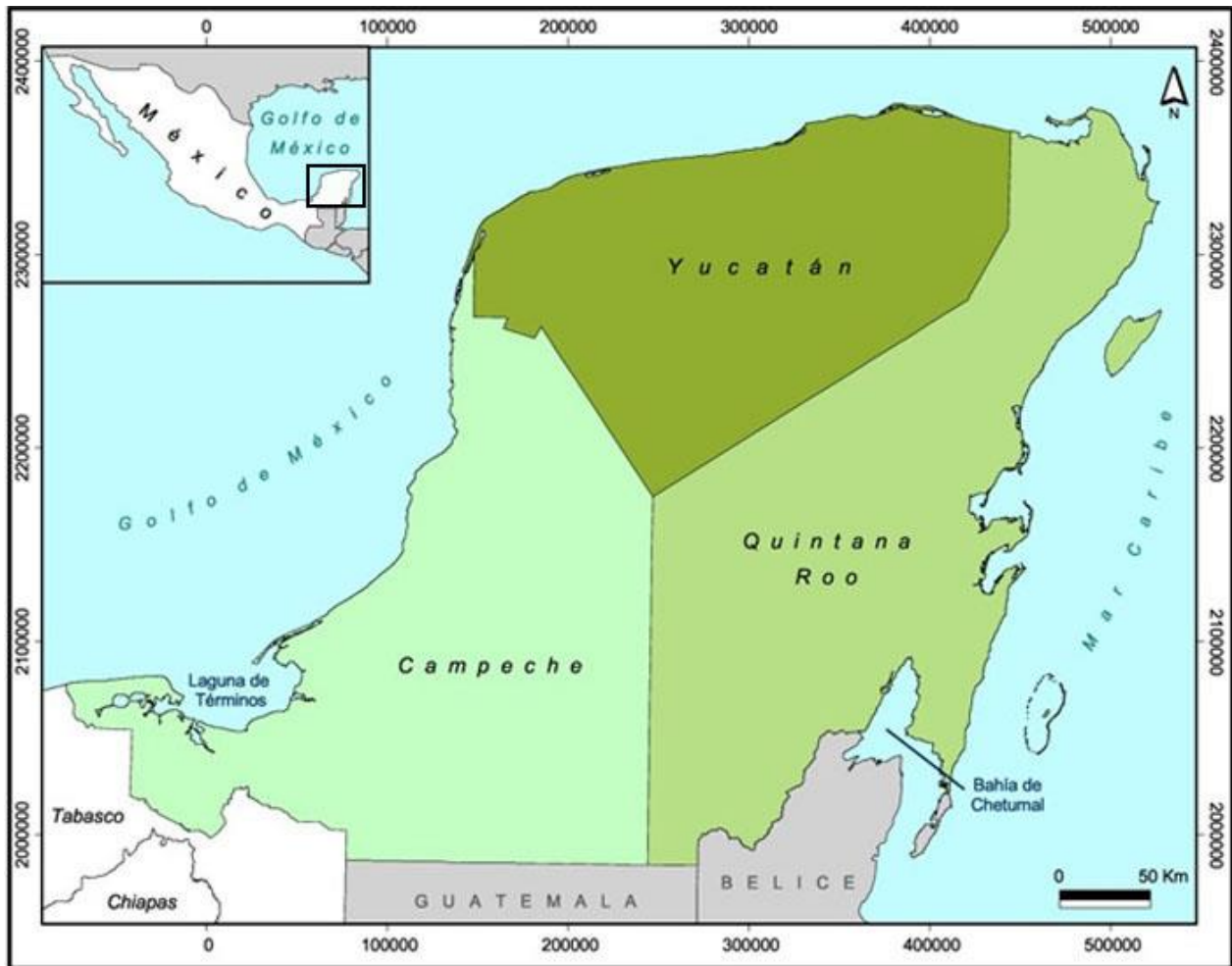
614

615

616

617

618



619

620

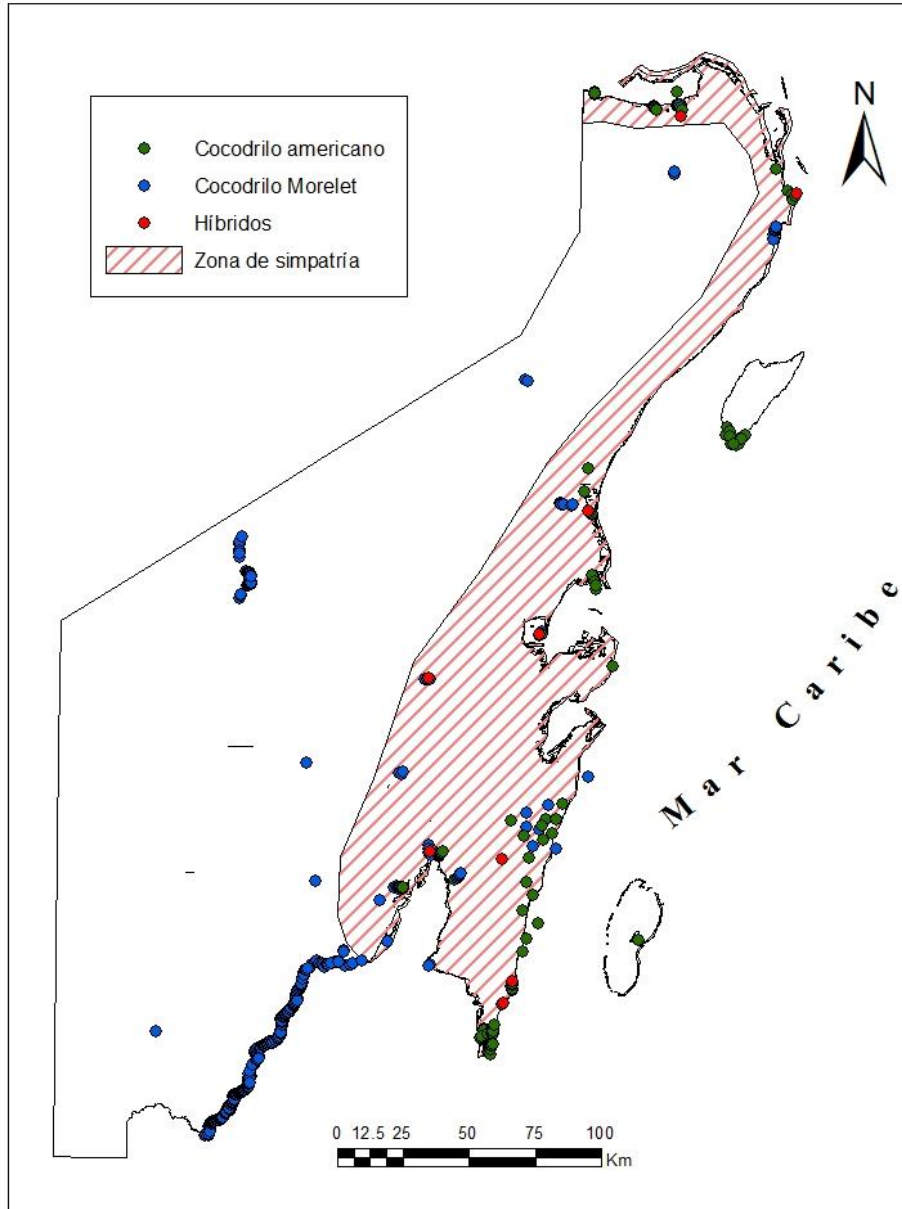
621 **Fig. 1.** Ubicación geográfica del área de estudio, Quintana Roo, en el sureste de
622 la república mexicana y Península de Yucatán.

623

624

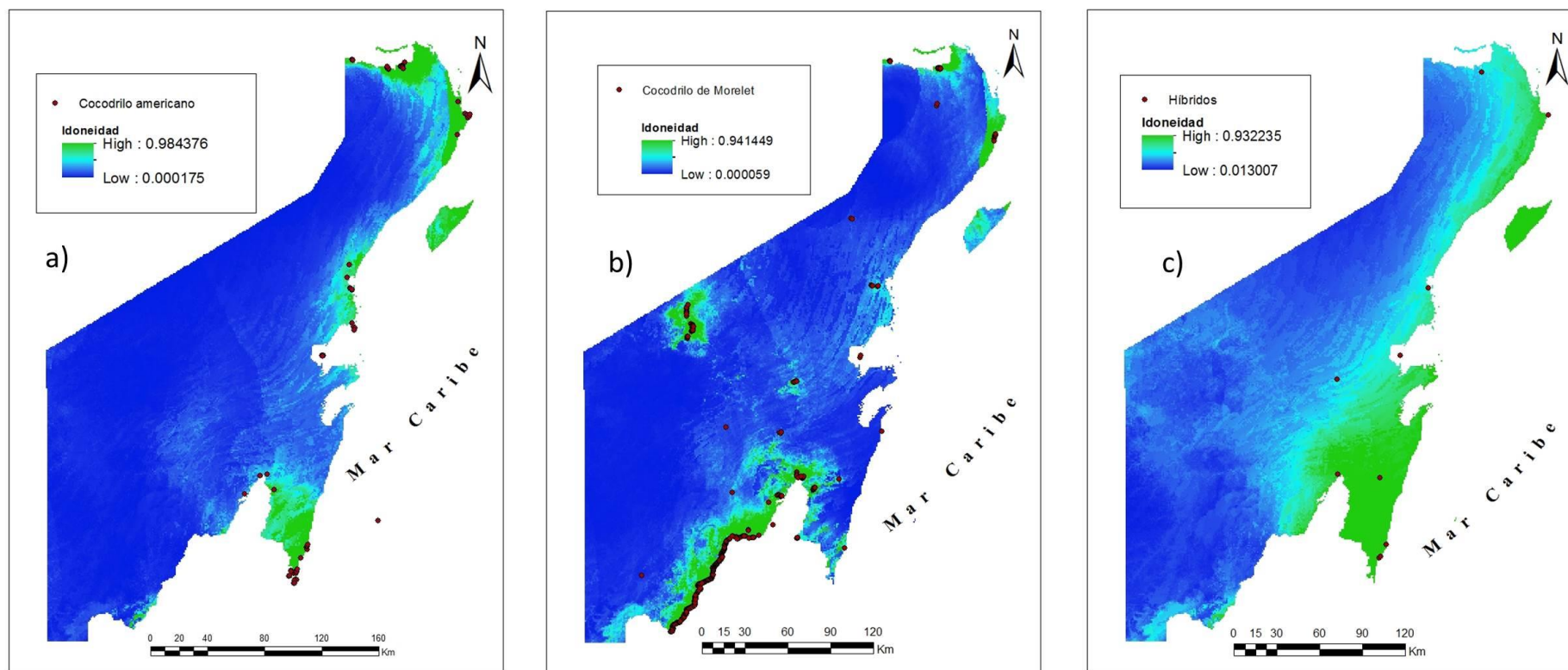
625 **Fig. 1.** Geographic location of the study area, Quintana Roo in southeastern
626 Mexico and the Yucatan Peninsula.

627



628
 629 **Fig. 2.** Distribución actual del cocodrilo americano (verde), cocodrilo de Morelet
 630 (azul) y cocodrilos híbridos (rojo) en el Caribe mexicano. Las líneas rojas consideran la
 631 zona de simpatria entre ambas especies.

632 **Fig. 2.** Current distribution of the American (green), Morelet's (blue), and hybrids
 633 crocodiles (red) in the Mexican Caribbean. Red lines show the sympatric zone of both
 634 species.



635 **Fig. 3.** Distribución potencial para: **A)** cocodrilo americano (n= 98), **B)** cocodrilo de Morelet (n= 747), **C)** híbridos
 636 del cocodrilo americano y cocodrilo de Morelet (n= 10). Para los tres modelos, las áreas en color verde son zonas con
 637 mayor idoneidad, según las variables ambientales consideradas por Maxent.

638 **Fig. 3.** Potential distribution of: **A)** the American crocodile (n= 98), **B)** Morelet's crocodile (n= 747), **C)** hybrids of the
 639 American and Morelet's crocodiles (n= 10). For all three models, green areas are those with higher suitability for each
 640 species and hybrids, depending on environmental variables considered by Maxent.

641
642
643
644
645
646
647
648
649
650
651
652
653
654
655
656
657
658
659
660

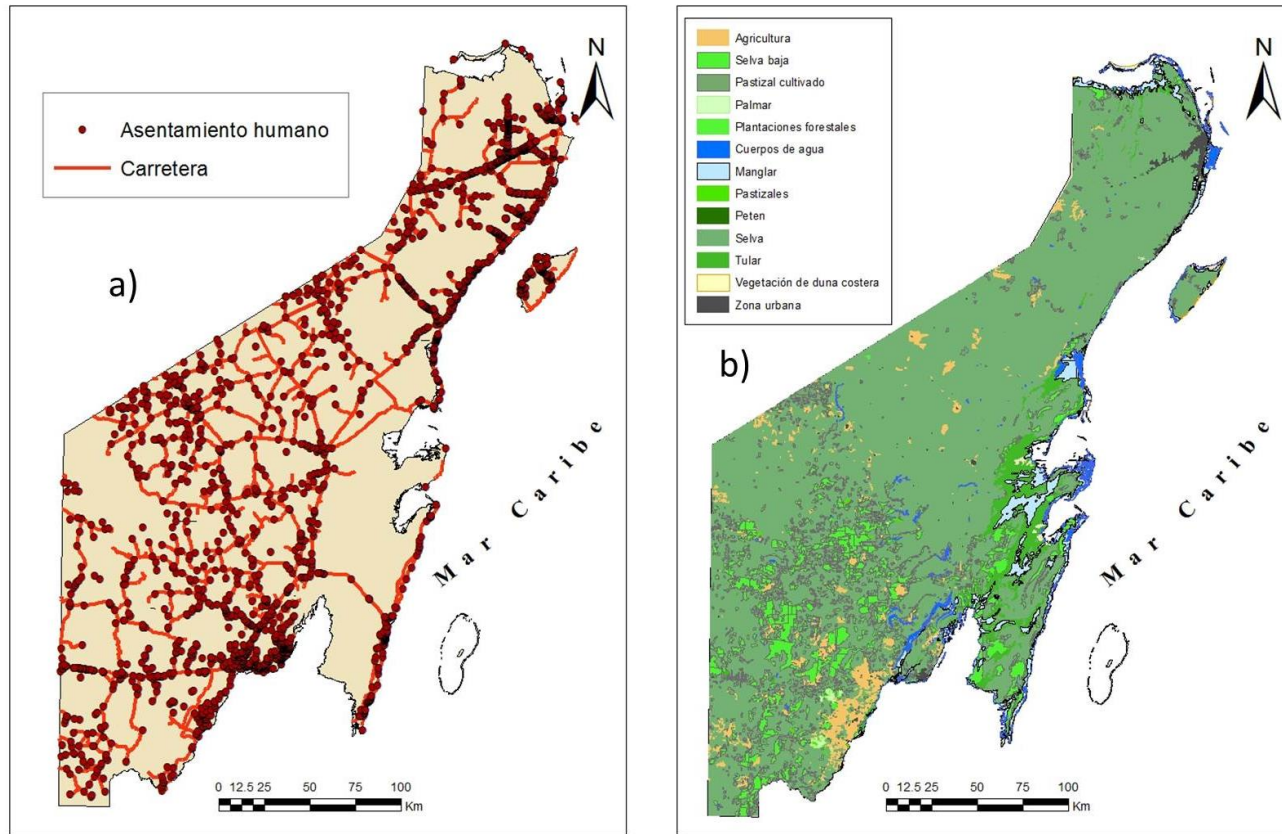


Fig. 4. A) Asentamientos humanos y carreteras de Quintana Roo. **B)** Principales usos de suelo y vegetación para Quintana Roo.

Fig. 4. A) Towns and roads of Quintana Roo. **B)** Land uses and vegetation in Quintana Roo.

CAPÍTULO III. CONCLUSIONES

En este estudio, se determinó la distribución actual y potencial de *C. acutus*, *C. moreletii* e híbridos entre ambas especies, así como la idoneidad de sus hábitats, para un mejor entendimiento de las problemáticas a las que se enfrentan. Los tres modelos de distribución potencial generados por Maxent resultaron satisfactorios, (los valores de AUC para todos los modelos fueron superiores a 0.9, validación del modelo superior a 0.8 y desviación estándar de 0.20 y 0.82), lo que indica que ambas especies de cocodrilo y sus híbridos tienen tolerancia a los cambios en las variables ambientales que se presentan en el Caribe mexicano (Phillips, et al., 2006). Sin embargo, el factor humano, se vuelve decisivo para la permanencia de los organismos (Pérez-Villegas y Carrascal, 2000).

En relación con las preguntas de investigación, se obtuvo lo siguiente: (1) El área con mayor idoneidad para *C. acutus* se encuentra en la zona costera de la parte norte (Cozumel, Tulum, Playa del Carmen, Puerto Morelos, Cancún, y APFFYB), centro (RBSK) y sur del estado (Península de Xcalak, Mahahual y RBBC). Para *C. moreletii*, su hábitat idóneo se encuentra en la parte sur (Bahía de Chetumal, Río Hondo y zonas aledañas), lagunas interiores del sur, centro y norte (Valle Hermoso, Chichankanab, Cobá y Ocom), Cozumel y lagunas costeras de la porción norte del estado (Puerto Morelos, Cancún y APFFYB). Por su parte, los híbridos tienen distribución potencial en toda la porción costera de Quintana Roo, principalmente en la Península de Xcalak, RBBC, alrededor de la Bahía de Chetumal, RBSK, Riviera Maya, Cozumel y Cancún. (2) Los hábitats en los que se encuentran actualmente los cocodrilos están bajo grandes y acelerados cambios, debido a la acción humana. Para *C. acutus*, el mayor riesgo es el desarrollo turístico en las playas arenosas; por su parte, para *C. moreletii* es la contaminación del hábitat por el uso de agroquímicos. (3) La creación de barreras debido a la transformación de la franja costera, conlleva al deterioro de los ambientes

usados por las especies y limita el intercambio de individuos entre las poblaciones, lo que podría ser un factor que promueva el proceso de hibridación (Hekkala et al., 2015).(4 y 5) La distribución actual de los cocodrilos híbridos es un área de simpatria que abarca toda la costa de Quintana Roo. Dicha área es muy similar a la que ocupa *C. acutus*, lo que implica un riesgo para su conservación a largo plazo, ya que la presencia del cocodrilo de Morelet y de los cocodrilos híbridos en esta misma área podría llevar a la desaparición del cocodrilo americano por introgresión genética (Rodríguez et al., 2008),

La primera hipótesis no se sustenta, debido a que considerando los resultados obtenidos, la distribución actual y potencial de *C. acutus*, *C. moreletii* y sus híbridos, no se limita a las áreas naturales protegidas; por el contrario, muchas de las zonas en las que se encuentran y que presentan factores ambientales idóneos para la permanencia de las especies, están sin protección y bajo fuerte presión antrópica.

Implicaciones para la conservación

A pesar de los esfuerzos realizados para la conservación de las poblaciones de cocodrilos y sus hábitats, varias áreas de su distribución están sujetas a cambios acelerados por el cambio en el uso de suelo por las actividades humanas. En el caso de Quintana Roo, esto se debe al incremento de las actividades productivas, como la agricultura, crecimiento de los asentamientos humanos y desarrollos turísticos mal planificados (Machkour-M'Rabet et al., 2009) que han disminuido en gran medida el potencial de estos ambientes para la preservación de las especies (Sánchez-Herrera et al., 2011). Por ello, considerando la importancia ecológica de los cocodrilos, es de suma importancia realizar investigaciones más específicas referentes al estado actual de sus hábitats, que incluyan los requerimientos básicos para cubrir sus necesidades (Delfín-Alfonso y Gallina, 2007; Hernández-Jiménez, 2013). Es necesario entender la situación actual de los hábitats de los cocodrilos que habitan en Quintana Roo para poder elaborar propuestas de conservación y manejo de sus poblaciones (López-Luna et al.,

2011). De igual manera, es necesario considerar el impacto de las actividades humanas e identificar los factores antrópicos que afectan la distribución de *C. acutus* y *C. moreletii*.

Deben considerarse también los organismos híbridos, los cuales son de suma importancia para entender la interacción entre las especies y los cambios que afectan su comportamiento, así como sus procesos evolutivos.

LITERATURA CITADA

- Álvarez del Toro, M. (1974). Los Crocodylia en México (Estudio comparativo). Ediciones del Instituto Mexicano de Recursos Naturales Renovables, A.C. 70 pp.
- Barrios-Quiroz, G. y Casas-Andreu, G. (2011). Método de evaluación y monitoreo del hábitat (EMH). Pp. 75-10. En: Sánchez Herrera, O., López Segurajáuregui, G., García Naranjo-Ortiz de la Huerta, A., y Benítez Díaz, H. (Eds.). Programa de monitoreo del cocodrilo de pantano (*Crocodylus moreletii*) México-Belice-Guatemala. México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México. 270 pp.
- Brown, J. H. y Lomolino, M. V. (1998). Distribution of single species. Pp. 61-93. En: Brown, J. H. y Lomolino, M. V. (Eds.). Biogeography, Segunda edición. Simaver Associates Incorporation. Massachussetts.
- Carrillo-Reyna, N. L. (2013). Abundancia relativa, selección de hábitat y distribución potencial del tapir centroamericano en la Península de Yucatán: estudio a escala regional. Tesis de Maestría, El Colegio de la Frontera Sur, San Cristóbal de las Casas, Chiapas, México. 101 pp.
- Carrillo-Reyna, N. L., Weissenberger, H. y Reyna-Hurtado, R. (2015). Distribución potencial del tapir centroamericano en la península de Yucatán. *Therya*, 6(3): 575-596.
- Cedeño-Vázquez, J. R. (2011). El cocodrilo, recurso milenario. Pp. 234-240. En: Pozo, C. et al. (Eds.). Riqueza Biológica de Quintana Roo. Un análisis para su conservación, Tomo I. El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR), Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), Gobierno del Estado de Quintana Roo y Programa de Pequeñas Donaciones (PPD). 344 pp.

- Cedeño-Vázquez, J. R., Rodríguez, D., Calmé, S., Ross, J. P., Densmore III, L. D. y Thorbjarnarson, J. B. (2008). Hybridization between *Crocodylus acutus* and *Crocodylus moreletii* in the Yucatan Peninsula: I. Evidence from mitochondrial DNA and morphology. *Journal of Experimental Zoology*, 309A: 661-673.
- Charruau, P, Cedeño-Vázquez, J. R., Villegas, A. y González-Cortés, H. (2010). Tasas de crecimiento del cocodrilo americano (*Crocodylus acutus*) en estado silvestre en la Península de Yucatán, México. *Revista Latinoamericana de Conservación*, 1(2): 63-72.
- CITES (Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres). (2015). Appendices I, II and III. Valid from 29 May 2016. Available via: <https://cites.org/esp/app/appendices.php>.
- Delfín-Alfonso, C. y Gallina, S. (2007). Modelo de evaluación de hábitat para el venado cola blanca en un bosque tropical caducifolio en México. *Escarabajos, Diversidad y Conservación Biológica. Ensayos en homenaje a Gonzalo Halfter*, 193-202.
- Hernández-Jiménez, R. (2013). El cocodrilo de pantano *Crocodylus moreletii* como elemento estratégico para la conservación de los ENPs Manglar de Tumulco y Ciénega del Fuerte. Tesis de Maestría, Universidad Veracruzana, Tuxpan, Veracruz, México. 88 pp.
- López-Luna, M. A., Hidalgo-Mihart, M. G. y Aguirre-León, G. (2011). Descripción de los nidos del cocodrilo de pantano *Crocodylus moreletii* en un paisaje urbanizado en el sureste de México. *Acta Zoológica Mexicana*, 27(1): 1-16.
- Machkour-M'Rabet, S., Hénaut, Y., Charrau, P., Gevrey, M., Winterton, P. y Legal. L. (2009). Between introgression events and fragmentation, islands are the last refuge for the American crocodile in Caribbean Mexico. *Marine Biology*, 156: 1321-1333.
- Morrison, M., Marcot, B. y Mannan, R. (1998). *Wildlife-habitat relationships: concepts and applications*. The University of Wisconsin Press. 2da ed. Madison. 343 pp.
- Pérez-Solano, L. A., Mandujano-Rodríguez S., Contreras-Moreno, F., Salazar, J. M. (2012). Primeros registros del temazate rojo *Mazama temama* en áreas

- aledañas a la Reserva de la Biosfera de Tehuacán-Cuicatlán, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 83: 875-878.
- Phillips, S., Anderson, R. y Schapire, R. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190: 231-259.
- Platt, S. G., Sigler, L. y Rainwater, T. R. (2010). Morelet's crocodile *Crocodylus moreletii*. Pp. 79-83. En: Manolis, S. C. y Stevenson, C. (Eds.). *Crocodiles. Status survey and conservation action plan. Third Edition*, Crocodile Specialist Group: Darwin.
- Ross, J. P. (1998). *Crocodiles. Status, survey and conservation action plan. 2ND Edition*. IUCN/SSC Crocodile Specialist Group. IUCN, Gland, Switzerland y Cambridge, U.K.
- Saab, V. (1999). Importance of spatial scale to habitat use by breeding birds in riparian forest: a hierarchical analysis. *Ecological Applications*, 9: 135-151.
- Sánchez-Herrera, O., López Segurajáuregui, G., García Naranjo-Ortiz de la Huerta A. y Benítez Díaz, H. (Eds.). (2011). Programa de monitoreo del cocodrilo de pantano (*Crocodylus moreletii*) México-Belice-Guatemala. México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México. 270 pp.
- Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2010). 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. *Diario Oficial de la Federación*.
- Serey, I., Barrera, F. y Moreira, D. (2011). Biodiversidad en ecosistemas y paisajes a escala regional. Pp. 95-109. En: Serey, I., et al. (Eds.). *Libro rojo de la región de O'Higgins*. Corporación Nacional Forestal-Universidad de Chile.
- Thorbjarnarson, J. B. (2010). American crocodile *Crocodylus acutus*. Pp. 46-53. En: Manolis, S. y Stevenson, C. (Eds.). *Crocodile Specialist Group: Darwin. Crocodiles. Status Survey and Conservation Action Plan. Third Edition*.

Watling, J., Brandt, L., Mazzotti, F. y Romañach, S. (2012). Use and interpretation of climate envelope models: A practical guide. University of Florida, 43 pp.