



UNIVERSIDAD DE SONORA

**DIVISIÓN DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y DE LA SALUD
DEPARTAMENTO DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS Y
TECNOLÓGICAS**

POSGRADO EN BIOCENCIAS

**FACTORES AMBIENTALES Y BIOLÓGICOS
SOBRE LA DIVERSIDAD FAUNÍSTICA PRESENTE
EN LA CUEVA DE LA MARIANA Y CUEVA EL
TIGRE EN EL ESTADO DE SONORA.**

TESIS

que para obtener el grado de:

MAESTRO EN BIOCENCIAS

presenta:

LUIS OMAR CALVA PÉREZ

Hermosillo, Sonora, México

Enero de 2017

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

DERECHOS DE AUTOR

El presente trabajo de tesis se presenta como uno de los requisitos parciales para la obtención del grado de **Maestro en Biociencias** de la Universidad de Sonora.

Se deposita en la biblioteca de Ciencias Biológicas y de la Salud para ponerla a disposición de los interesados. Se permiten citas breves del material contenido en la tesis sin permiso del autor, siempre y cuando se otorgue el crédito correspondiente. Para reproducir, o en su caso referirse a este documento en forma parcial o total, se deberá solicitar la autorización al Coordinador del Programa del Posgrado.

Bajo cualquier otra circunstancia se debe solicitar permiso directamente al autor.

Atentamente

Biól. Luis Omar Calva Pérez

Autor

Dra. Nohemí Gámez Meza

Coordinadora del Programa de Maestría en Biociencias

FACTORES AMBIENTALES Y BIOLÓGICOS SOBRE LA DIVERSIDAD FAUNÍSTICA
PRESENTE EN LA CUEVA DE LA MARIANA Y CUEVA EL TIGRE EN EL ESTADO
DE SONORA

T E S I S

que para obtener el grado de:
MAESTRO EN BIOCENCIAS

presenta:

LUIS OMAR CALVA PÉREZ

APROBACIÓN

Los miembros del Comité designado para revisar la tesis titulada “Factores ambientales y biológicos sobre la diversidad faunística presente en la Cueva de la Mariana y Cueva El Tigre en el estado de Sonora” presentada por Luis Omar Calva Pérez, la han encontrado satisfactoria y recomiendan que sea aceptada como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Biociencias.



Dra. Reyna Amanda Castillo Gámez
Directora



Dr. Alfonso Enrique Meling López
Secretario



Dr. Rogelio Monreal Saavedra
Sinodal interno



Dr. Francisco Molina Freaner
Sinodal externo



Mtro. Clément Jean Marie Ronzon
Sinodal externo

“Don’t fuss if your career or life path appears to be a little bit circuitous, you never really know where any given skill or experience might lead you”

Marina Elliott

DEDICATORIA

A mis amados padres, María de Lourdes Pérez Almazán y Luis Alberto Calva Fonseca, quienes siempre me han brindado su apoyo incondicional y confianza.

A los miembros del Grupo Pionero Espeleológico de Sonora, que este trabajo no pudiera haberse realizado sin su valiosa participación.

A la comunidad espeleológica de México y del mundo, para que sepan que en el estado de Sonora tenemos cuevas con fauna increíble.

AGRADECIMIENTOS

Al Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Universidad de Sonora y al Posgrado en Biociencias, por permitirme realizar mis estudios de maestría dentro de sus instalaciones.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por brindarme el apoyo económico para la realización de este proyecto y mis estancias de investigación.

A la Dra. Reyna A. Castillo Gámez, por aceptarme con este proyecto, muy distinto a lo que se había realizado en Sonora y que desde el inicio ha brindado buenos resultados, además de los momentos de risas y su apoyo en todo momento.

Al Dr. Alf Meling López, por enseñarme como desarrollarme profesionalmente como biólogo desde la Licenciatura y por sus comentarios durante el desarrollo de la investigación.

Al Dr. Rogelio Monreal Saavedra, por adentrarme al mundo de la geología, visualizando desde otra perspectiva a las cuevas.

Al Dr. Francisco Molina Freaner, por todas las facilidades brindadas con equipo y sus consejos durante el estudio de los murciélagos.

Al Mtro. Clément Ronzon, por ser mi guía cuando inicie en la espeleología, compañero de exploraciones, co-fundador de G-PES y mi amigo en cuevas.

Al Biól. Saúl Aguilar Morales por acompañarme a las cuevas y aconsejarme sobre las técnicas de muestreo más adecuadas para los estudios bioespeleológicos a realizar.

Un especial agradecimiento a los académicos Dr. José G. Palacios Vargas y Dra. Blanca E. Mejía Recamier de la Facultad de Ciencias de la UNAM, por sus enseñanzas en área de los microartrópodos y en la identificación de los ejemplares.

A Olivier Guillaume y Christine Perrin, por permitirme hacer mi estancia de investigación en la Station d'Ecologie Théorique et Expérimentale del Centre National de la Recherche Scientifique, en Moulis, Francia, siendo cuna de la bioespeleología a nivel mundial.

A los investigadores Dr. Rodrigo Medellín, Dr. Harry Brailovsky, Dr. Fabio Cupul Magaña, Dr. Alfonso García, Dr. Gabriel Villegas, M. en C. Griselda Montiel, Mtro. Alfredo Ochoa, Biól.

Ernesto Barrera, Klaus Reinhardt y Steffen Roth por su valioso apoyo en cada una de sus especialidades.

A Eduardo Gracia, Karla Almanza, Luis de la Fuente, Alejandra de la Torre, Adán Gallego, Estefanía Ramírez, Raisa Preciado, José Romero y Gemma Estrada, por arriesgarse junto conmigo a la exploración de cuevas, y apoyarme dentro y fuera de ellas.

A los miembros del Grupo Pionero Espeleológico de Sonora, por las exploraciones realizadas a las cuevas investigadas, así como a muchas otras.

Al Sr. Carlos Ochoa y Sr. Rigoberto Peralta, por proporcionarme todas las facilidades para acceder a sus cuevas.

A mi familia, por apoyarme incondicionalmente a pesar de siempre estar preocupados por adentrarme en cuevas.

Y a todas las personas que en algún momento me acompañaron durante mi formación como bioespeleólogo, que sin duda, sin su apoyo no hubiera sido posible convertir mi pasión en mi profesión.

RESUMEN

México es considerado un país megadiverso y en el ambiente subterráneo no es la excepción. Los estudios bioespeleológicos en México son escasos, y más lo que intentan determinar la interacción que existe entre las especies que habitan una cueva, así como la relación con su medio físico. El conocimiento de la bioespeleología para Sonora ha sido poco o nulo, representando a nivel nacional el 1.2%. Por ello, el objetivo de este trabajo fue determinar los factores abióticos y bióticos que influyen en la diversidad faunística en dos cuevas kársticas en la región central del estado de Sonora durante un año (Abril 2015 - Abril 2016). Para cumplir con dicho objetivo se realizó la topografía de la Cueva de la Marina y Cueva El Tigre, a partir de ahí se diseñaron los muestreos y las variables a analizar. Se colocaron dos sensores en cada una de las cuevas en la zona de transición y zona profunda de cada cueva para determinar la temperatura y humedad relativa, también se identificó el recurso energético presente en ambas cuevas, y se colectó y preservó a la fauna presente mediante diferentes métodos (método Berlese-Tullgren, trampas-cebo, cámara-trampa, colecta directa, etc.). La Cueva de la Mariana (CM) tuvo una extensión de 497 m y un desarrollo vertical de 44 m, y la Cueva El Tigre (CT), un desarrollo horizontal de 156 m y 46 m de desarrollo vertical. El clima de las cuevas fue distinto, registrándose para CM una temperatura media anual de 26.54 °C y 52% de humedad relativa anual, y para CT fue de 29.27 °C y 67%, respectivamente. La fauna encontrada representó 23 órdenes, 38 familias, 51 géneros y 52 especies. La comunidad cavernícola dependen del guano generado por siete especies de murciélagos, siendo el murciélago guanero de cola libre (Molossidae: *Tadarida brasiliensis*) el más importante con una población de medio millón en la Cueva de la Mariana y de un millón de individuos en Cueva El Tigre en verano. Además, la temperatura y la humedad relativa presentaron una correlación positiva con respecto a la abundancia encontrada. Con base a los índices utilizados, se encontró que hay diferencias significativas entre la riqueza y abundancia de cada una de las cuevas. La alteración o remoción de las poblaciones de murciélagos dentro de ambas cuevas puede ocasionar la extinción local del 80% de las especies registradas.

ABSTRACT

Mexico is considered a megadiverse country and the subterranean environment is no exception. Biospeleological studies in Mexico are poorly known, most of them trying to explain the interaction between species richness that inhabit in caves, as well as the relationship with their physical environment. There is a shortage of knowledge of the biospeleology of the state of Sonora, representing just 1.2% of Mexico speleological studies. Therefore, the objective of this work was to determine the influence of abiotic and biotic factors on the faunal diversity in two karstic caves in the central region of Sonora during a year (April 2015 - April 2016). In order to accomplish the objective, we surveyed the Cueva de la Marina and Cueva El Tigre. Then, two sensors were placed in each cave in the transition zone and deep zone of the cave to determine the temperature and relative humidity; also the energy resource present in both caves was identified, and the fauna was collected and preserved through different methods (Berlese-Tullgren method, traps-bait, camera-trap, direct collection, etc.). The Cueva de la Mariana (CM) has an extension of 497 m and a vertical development of 44 m, and the Cueva El Tigre (CT), a horizontal development of 156 m and 46 m of vertical development. The climate of the caves was different, with a mean annual temperature of 26.54 °C and 52% annual relative humidity for CM, and for CT was 29.27 °C and 67%, respectively. The recorded fauna represented 23 orders, 38 families, 51 genera and 52 species. This cave community depends of the guano produced by seven species of bats, being the Mexican free-tailed bat (Molossidae: *Tadarida brasiliensis*) the most important with a population of half of a million in Cueva de la Mariana and a million individuals in Cueva El Tigre in summer. Also, the temperature and relative humidity have a positive correlation with the abundance of the diversity found. Based on several indices, significant differences were detected between the richness and abundance of the two caves. The alteration on elimination of the bat populations inside both caves can produce local extinction of 80% of the species registered.

ÍNDICE GENERAL

	Página
APROBACIÓN	i
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTOS	vii
RESUMEN	ix
ABSTRACT	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xvi
ÍNDICE DE TABLAS	xix
INTRODUCCIÓN	1
I. ANTECEDENTES	5
I.1. Ambiente subterráneo	5
I.1.1. Clima del ambiente subterráneo	6
I.1.2. Zonación en cuevas	7
I.2. Espeleología y su enfoque en las cuevas	9
I.2.1. Espeleogénesis	10
I.2.2. Cuevas kársticas	11
I.3. Bioespeleología	13
I.3.1. Diversidad biológica de las cuevas	13
I.3.2. Clasificación ecológica de la fauna cavernícola	15
I.3.3. Factores abióticos que condicionan la vida en cuevas	17
I.3.4. Factor biótico que condiciona la vida en cuevas	18
I.4. Espeleología en México	20
I.4.1. Estudios bioespeleológicos en México	20
I.5. Situación actual de la espeleología en Sonora	21
I.5.1. Bioespeleología de Sonora	21
II. HIPÓTESIS	25
III. OBJETIVOS	27
III.1. Objetivo general	27
III.2. Objetivos particulares	27
IV. MATERIALES Y MÉTODOS	29
IV.1. Descripción de las áreas de estudio	29
IV.2. Cartografía de la Cueva de la Mariana y Cueva El Tigre	31
IV.3. Caracterización de las zonas físicas de las cuevas	31
IV.3.1. Temperatura y humedad relativa de las cuevas	31
IV.4. Colecta y preservación de fauna cavernícola	32
IV.4.1. Invertebrados cavernícolas	33
IV.4.1.1. Fauna asociada al guano	33

IV.4.1.2. Métodos directos	35
IV.4.1.3. Trampas con cebo	35
IV.4.2. Vertebrados	36
IV.4.2.1. Métodos directos	36
IV.4.2.2. Métodos indirectos	37
IV.4.2.3. Cámaras-trampa	37
IV.5. Análisis estadístico	38
IV.5.1. Curva de acumulación de especies	38
IV.5.2. Índice de diversidad	39
IV.5.2.1. Índice de Simpson	39
IV.5.2.2. Índice de Diversidad de Shannon-Wiener	40
IV.5.3. Índices de similitud de la diversidad faunística	42
IV.5.4. Valores de regresión	44
V. RESULTADOS	47
V.1. Descripción y cartografía de las cuevas	47
V.1.1. Cueva de la Mariana	47
V.1.2. Cueva El Tigre	52
V.2. Clima de la Cueva de la Mariana y Cueva El Tigre	53
V.2.1. Clima interno de la Cueva de la Mariana	53
V.2.2. Clima interno de la Cueva El Tigre	56
V.2.3. Comparación del clima de ambas cuevas	58
V.3. Zonación de la Cueva de la Mariana y Cueva El Tigre	60
V.4. Guano	60
V.5. Diversidad biológica	63
V.5.1. Riqueza de especies faunísticas de la Cueva de la Mariana y Cueva El Tigre	63
V.5.2. Fauna cavernícola	65
V.5.3. Curvas de acumulación de especies de la Cueva de la Mariana y Cueva El Tigre	75
V.5.4. Índices de diversidad y de similitud	78
V.5.5. Biotopo	80
V.6. Correlaciones	84
V.7. Red trófica	85
VI. DISCUSIÓN	87
VI.1. Cueva de la Mariana y Cueva El Tigre	87
VI.2. Clima de la Cueva de la Mariana y Cueva El Tigre	87
VI.3. Cuevas de calor	89
VI.4. Zonación de la Cueva de la Mariana y Cueva El Tigre	90
VI.5. Recurso energético de la Cueva de la Mariana y Cueva El Tigre	90
VI.6. Diversidad faunística cavernícola	91

VI.7. Biotopo	93
VI.8. Factores que influyen en la diversidad faunística en ambas cuevas ...	95
VI.9. Red trófica	96
VII. CONCLUSIONES	97
VIII. RECOMENDACIONES	99
IX. LITERATURA CITADA	101
X. APÉNDICES	109

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1	Perfil del medio subterráneo: 1) cuevas accesibles al hombre, 2) grietas y fisuras inaccesibles al hombre, 3) Medio Subterráneo Superficial (M.S.S), 4) madriguera y 5) cavidad artificial. Tomado de Carabajal <i>et al.</i> (1996).	5
2	Zonación en cuevas, con cada una con las zonas físicas que las componen, delimitando a las cuevas en tres ambientes que varían en la estructura y composición de especies. Tomado de Galán y Herrera (1998).	8
3	Modelo de un paisaje kárstico, observándose la parte superficial, en donde se aprecian cañones, lapiaz, poljés, sumidero, dolina y la sección subterránea en donde se forman las cuevas, galerías, estalactitas y estalagmitas, por mencionar algunas formaciones. Tomado de Calvo-Aldea <i>et al.</i> (2009).	12
4	Ubicación de la Cueva El Tigre y la Cueva de la Mariana con respecto a los poblados de San Miguel de Horcasitas y Carbó del estado de Sonora. Elaborado por Karen Bustamante (2016).	29
5	Sección de la Carta Geológica-Minera de Carbó H12-D21, se aprecia en tono morado el área de dolomía-cuartiza del periodo Proterozoico y Cámbrico en donde están ubicadas la Cueva El Tigre y la Cueva de la Mariana. Se puede observar además, que la Cueva El Tigre está registrada por el Servicio Geológico Mexicano, mientras que en el Cerro de la Mariana no existe información sobre la cueva. Fuente: Servicio Geológico Mexicano (2012).	30
6	Esquema del sensor Arduino data logger diseñado y creado específicamente para esta investigación.	32
7	Embudos de lámina utilizados para la extracción de la fauna asociada al guano mediante el método de Berlese-Tullgren.	34
8	Mapa de planta de la Cueva de la Mariana con una extensión de 497 metros y un desarrollo vertical de 44 metros, conformado por la Sala Derrumbe, Sala Transición, Sala Mosaico y Sala de los Murciélagos.	48

9	Mapa alzado de la Cueva de la Mariana con una extensión de 497 metros y un desarrollo vertical de 44 metros, se puede observar el desarrollo vertical y las profundidades máximas de la Sala Mosaico y el Tobogán.	49
10	Mapa de planta de la Cueva El Tigre con una extensión de 156 metros y un desarrollo vertical de 46 metros, siendo su área más profunda la Sala Spilogale con -33 metros..	54
11	Mapa alzado de la Cueva El Tigre, ubicada en la localidad de San Miguel de Horcasitas, conocida por su población del murciélago guanero <i>Tadarida brasiliensis</i> , llegando en cierta época del año al millón de individuos, localizándose en toda la cueva.	55
12	Clima interno de la Cueva de la Mariana de su zona más profunda (Sala de los Murciélagos).	59
13	Clima interno de la Cueva El Tigre de su zona más profunda (Sala Spilogale).	59
14	Tamaño de la población de <i>Tadarida brasiliensis</i> y la suma de las poblaciones de los demás quirópteros presentes dentro de la Cueva de la Mariana.	62
15	Tamaño de la población de <i>Tadarida brasiliensis</i> y la suma de las poblaciones de los demás quirópteros presentes en la Cueva El Tigre.	62
16	Tamaño poblacional aproximado de la especie de murciélago <i>Tadarida brasiliensis</i> en la Cueva de la Mariana y Cueva El Tigre.	63
17	Número de especies de cada uno de los órdenes de artrópodos presentes en la Cueva de la Mariana (CM), Cueva El Tigre (CT) y las especies compartidas.	64
18	Número de especies de cada uno de los órdenes de vertebrados presentes en la Cueva de la Mariana (CM), Cueva El Tigre (CT) y las especies compartidas.	65
19	Curva de acumulación de Clench y de especies observadas de ambas en función de su TBT (Tiempo Bajo Tierra), con sus respectivo valor de asíntota (riqueza estimada).	77
20	Curva de acumulación de Clench y de especies observadas de ambas en función de su TBT (Tiempo Bajo Tierra), con sus respectivo valor de asíntota (riqueza estimada).	78

21	Biotopos para los invertebrados y vertebrados dentro de la Cueva de la Mariana con el número de especies para cada uno de los órdenes presentes en dicha cueva.	82
22	Biotopos para los principales órdenes de invertebrados y vertebrados dentro de la Cueva El Tigre con el número de especies presentes en dicha cueva.	83
23	Modelo hipotético del flujo de energía del exterior al interior de la Cueva de la Mariana con sus niveles tróficos detectados, siendo muy similar el de la Cueva El Tigre.	85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla		Página
1	Temperatura media (Temp. °C), máxima (Temp. máx.) y mínima (Temp. mín.) mensuales para la Sala Transición y Sala de los Murciélagos de la Cueva de la Mariana.	56
2	Humedad relativa media (HR %), máxima (HR máx.) y mínima (HR mín.) mensuales para la Sala Transición y Sala de los Murciélagos de la Cueva de la Mariana.	57
3	Temperatura media (Temp. °C), máxima (Temp. máx.) y mínima (Temp. mín.) mensuales para la Sala Amonio y Sala Spilogale de la Cueva El Tigre.	57
4	Humedad relativa media (H %), máxima (HR máx.) y mínima (HR mín.) mensuales para la Sala Amonio y Sala Spilogale de la Cueva El Tigre.	58
5	Zonación física de ambas cuevas con sus respectivas salas.	60
6	Riqueza observada ($R_{observada}$), riqueza estimada ($R_{estimada}$) y su desviación estándar (s) para especies presentes en la Cueva de la Mariana (CM) y Cueva El Tigre (CT).	76
7	Índices de diversidad aplicados a la diversidad faunística presente en la Cueva de la Mariana (CM) y Cueva El Tigre.	79
8	Índices de similitud aplicados a la diversidad faunística compartida entre la Cueva de la Mariana y Cueva El Tigre.	79
9	Resultados del coeficiente de correlación para las variables ambientales y biológicas en función de la diversidad faunística (abundancia total de las especies encontradas) en la Cueva de la Mariana.	84
10	Resultados del coeficiente de correlación para las variables ambientales y biológicas en función de la diversidad faunística (abundancia total de las especies encontradas) en la Cueva El Tigre.	84

INTRODUCCIÓN

La bioespeleología se encarga del estudio del componente biológico de los ambientes subterráneos, lo que ha permitido la investigación de complejos ecosistemas subterráneos con una amplia diversidad de especies, algunas con adaptaciones únicas para habitar dichos medios (Viré, 1904; Hoffmann *et al.*, 1986; Galán, 1993; Romero, 2009).

Los ambientes subterráneos más comunes son las cuevas y cavernas, debido a que sus dimensiones permiten el acceso de los investigadores (Moore y Sullivan, 1997; Culver y Pipan, 2009; Palmer, 2012). En la antigüedad, estos ambientes eran visualizados como áreas en donde la vida era improbable, principalmente por una prevalente oscuridad y por consecuencia, la falta de productores primarios (plantas). Sin embargo, este pensamiento fue cambiando conforme se realizaron distintas expediciones bioespeleológicas, obteniendo como resultado una vasta diversidad dentro de los ambientes subterráneos (Galán, 1993; Montero-García, 2000; Sket, 2008; Romero, 2009).

En la bioespeleología, sus estudios están enfocados principalmente a la fauna, así como las diferentes interacciones entre las poblaciones cavernícolas con su medio físico, los mecanismos evolutivos de sus adaptaciones en dichos hábitats y su biogeografía (Hoffmann *et al.*, 1986; Moulds, 2005; Culver y Pipan, 2009; Romero, 2009; Palacios-Vargas *et al.*, 2014a).

La fauna ha sido el centro de atención de los bioespeleólogos durante décadas, específicamente las especies clasificadas como troglobios (Racovitza, 1907; Sket, 2008; Romero, 2009). Sin embargo, debido a que una cueva presenta una división en zonas, desde la primera zona donde el acceso de luz es limitada, continuando con la sección de penumbra y variabilidad climática, hasta que se llega a un ambiente sin cambios drásticos, sumergido en una oscuridad absoluta, la riqueza de especies que se encuentra es diversa y heterogénea, observándose desde estadios larvarios de algunos invertebrados hasta grandes mamíferos. La ausencia o presencia de fauna en una cueva dependerá de muchos factores como son las dimensiones de la cueva, presencia de agua, gradiente de humedad, temperatura, consistencia y composición de las paredes y los recursos energéticos, los cuales son considerados los principales reguladores de la riqueza y abundancia de las especies cavernícolas, así como la

interacción entre ellas (Hoffmann *et al.*, 1984; Galán, 1993; Aguilar-Morales y Ruíz-Castillo, 1995; Carabajal *et al.*, 1996; Galán y Herrera, 1998; Hoffmann *et al.*, 2004; Culver y Pipan, 2009; Romero, 2009).

A nivel mundial, el listado de especies cavernícolas incrementa conforme se realizan expediciones en nuevas cuevas o a mayores profundidades. Sin embargo las especies reportadas han predominado en ambientes templados, en donde sus contrapartes, los ambientes tropicales y desérticos, han proporcionado una gran diversidad de especies a pesar de su falta de exploración a comparación de las cuevas provenientes de Estados Unidos y Europa (Galán y Herrera, 1998; Culver y Pipan, 2009; Romero; 2009).

México es un país rico en diversidad biológica y en número de cavidades subterráneas, ya que en casi todos los estados de la República existen cuevas y cavernas. Así mismo, se ha dicho que la diversidad de especies, especialmente la fauna es una de las más ricas y abundantes (Reddell, 1981; Lazcano, 1983; Hoffmann *et al.*, 1986, Palacios-Vargas *et al.*, 2014a). En México, los bioespeleólogos han realizado numerosos trabajos sobre la fauna en cuevas de México desde hace más de 70 años, registrando más de 1,200 cuevas y 2,000 especies, entre invertebrados y vertebrados, predominando el grupo de los artrópodos. Sin embargo, muchos de los inventarios se han enfocado al centro y sur de México (Mitchell y Reddell, 1973; Reddell, 1977; Palacios-Varga, 1985; Palacios-Vargas, 1993a; Aguilar-Morales y Ruíz-Castillo, 1995; Hoffmann *et al.*, 2004, Reddell, 2005; Reddell, 2006; Bribiesca-Contreras y Solís Marín, 2014; Palacios-Vargas *et al.*, 2014a).

El estado de Sonora está pobremente representado tanto en el número de cavidades subterráneas naturales, así como la fauna que se alberga en estos ambientes hipogeos (Calva y Castillo-Gámez, 2014). Sonora presenta diferentes tipos de ecosistemas y una evolución geológica heterogénea, que lo beneficia como sitio idóneo para la formación de distintas cavidades y la presencia de diferentes especies faunísticas dentro de ellas (Hoffmann *et al.*, 1986; González-León, 2010; Molina-Freaner y Van Devender, 2010). Nuestro estado puede ser pionero en el estudio de cuevas en zonas áridas de México, ya que no se ha realizado un inventario bioespeleológico en esta sección del país, así como la evaluación de los factores que determinan la diversidad de especies.

Por ello, este trabajo planteó determinar la diversidad faunística dentro de dos cuevas, la Cueva de la Mariana y Cueva El Tigre, así como caracterizar su zona física y su clima interno. Además de estimar la riqueza y abundancia de especies dentro de ambas cuevas y evaluar los factores que condicionan su presencia.

I. ANTECEDENTES

I.1. Ambiente subterráneo

Una cueva puede ser definida dependiendo de la perspectiva de estudio, para los geólogos, por ejemplo, una cueva es un espacio vacío de origen natural que se encuentra bajo la superficie terrestre, lo suficientemente extensa para permitir el acceso del hombre (Palmer, 2012). Sin embargo, esta definición excluye a una variedad de ambientes que se encuentran por debajo de la superficie terrestre y que tiene el potencial para albergar distintas especies dentro de ellas.

Por ende, se ha establecido desde la perspectiva biológica a las cuevas como parte del ambiente o hábitat subterráneo, en donde se incluyen además tubos de lava, red de fisura, el medio subterráneo superficial, cavidades artificiales, etc. (Galán, 1993; Carabajal *et al.*, 1996; Culver y Pipan, 2009). Véase Figura 1.

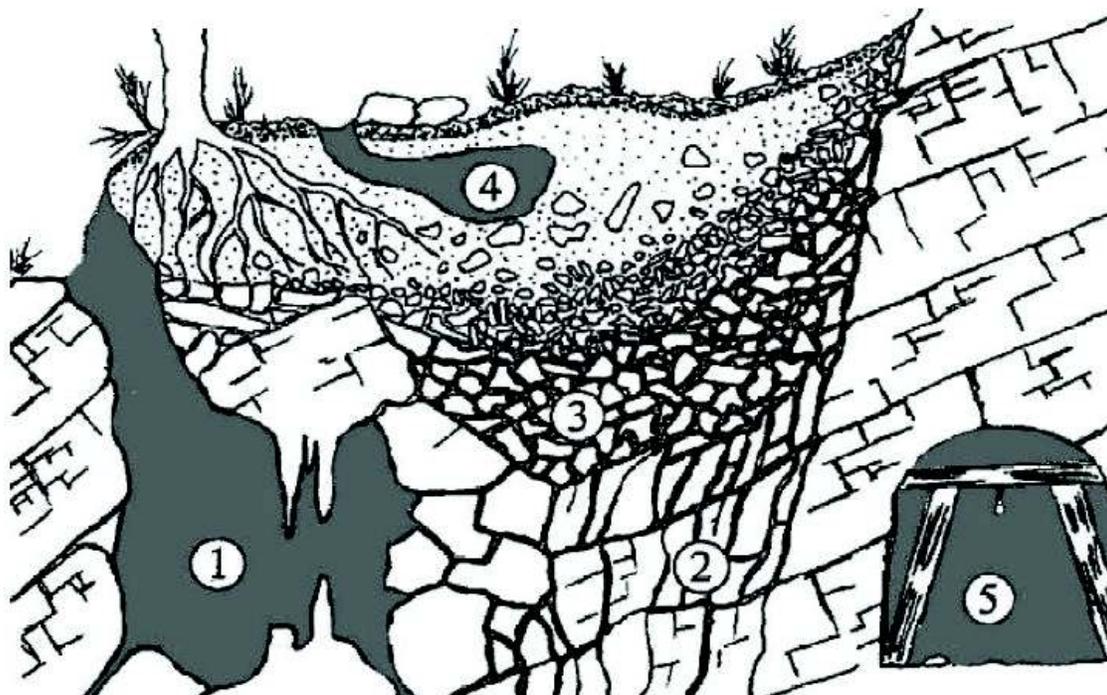


Figura 1. Perfil del medio subterráneo: 1) cuevas accesibles al hombre, 2) grietas y fisuras inaccesibles al hombre, 3) Medio Subterráneo Superficial (M.S.S), 4) madriguera y 5) cavidad artificial. Tomado de Carabajal *et al.* (1996).

Un ambiente subterráneo se define como toda cavidad, cualquiera que sea su tamaño, que es un hábitat potencial para las especies terrestres, dulceacuícolas o marinas, solamente si en ella hay recursos energéticos y si presentan las características del clima subterráneo (Galán, 1993; Carabajal *et al.*, 1996).

La incorporación de estos otros sitios ha permitido considerar al ambiente subterráneo como un ecosistema complejo, ya que esta variación de cavidades amplía los límites y la extensión de las cuevas mismas (Carabajal *et al.*, 1996; Culver y Pipan, 2009).

Sin embargo, a pesar de los distintos ambientes subterráneos, las cuevas y sus variaciones (cavernas o grutas) son las más conocidas en la actualidad y de mayor interés, ya que son consideradas laboratorio naturales.

Dentro de una cueva existe evidencia sobre la evolución de la Tierra, depósitos de minerales de interés, paleoclimas, información sobre el movimiento de las aguas subterráneas y recarga de los acuíferos, contaminación de aguas subterráneas, fauna adaptada a ambientes de completa oscuridad, su evolución y biogeografía, evidencias de civilizaciones prehistóricas, entre muchas más (Moore y Sullivan, 1997; Martínez-Hernández, 2004; Culver y Pipan, 2009; Romero, 2009; Palmer, 2012; Bribiesca-Contreras y Solís Marín, 2014).

Por ello, su investigación proporciona una vasta información sobre el pasado y presente de la Tierra y las especies que la han habitado, de ahí su relevancia.

I.1.1. Clima del ambiente subterráneo

El ambiente subterráneo posee un clima característico y único, que lo diferencia de otros hábitats. Las cuevas son mucho menos variables que en la superficie, siendo consideradas como ambientes estables (Hoffmann *et al.*, 1986; Carabajal *et al.*, 1996).

El principal factor para considerar a cualquier cavidad como parte del ambiente subterráneo es la ausencia de luz. Los ambientes subterráneos son los únicos lugares donde se presenta la oscuridad total. Por esta razón se sospechaba que la vida en las profundidades era inexistente debido a la carencia de seres autótrofos y, por consecuencia, de cadenas tróficas (Carabajal *et al.*, 1996; Montero-García, 2000). La oscuridad total es un factor constante que

caracteriza a las cavidades de los demás hábitats en la superficie terrestre y acuática, a excepción de las zonas abisales de los océanos.

Otro factor típico es la temperatura, que es aproximadamente la media anual de la temperatura de la región externa en donde se encuentra ubicada la cueva (Hoffmann *et al.*, 1986; Moore y Sullivan, 1997; Galán y Herrera, 1998; Palmer, 2012). La temperatura de las cuevas depende de la altitud y latitud en donde se encuentra, además del origen, morfología y dimensión de la cueva (Poulson y White, 1969; Rouch, 1986).

El aire de la mayoría de las cuevas se encuentra saturado con vapor de agua, en otras palabras, presentan una alta humedad relativa. Los valores de la humedad son variados, dependiendo de la localización geográfica de las cuevas, el clima externo, la profundidad y la presencia de cuerpos de agua. Sin embargo el ambiente subterráneo usualmente contiene una humedad relativa próxima a la saturación, comprendida entre un 95% y 100% (Trombe, 1952; Hoffmann *et al.*, 1986; Galán, 1993; Carabajal *et al.*, 1996).

Las cuevas y sus variaciones presentan estas condiciones climáticas en las zonas más profundas, en pequeños espacios o en cuevas con restringido intercambio de aire. El número de entradas que posee una cueva, genera una zonación dentro de dicho ambiente subterráneo, siendo las partes someras y de transición con más variaciones en la temperatura y humedad relativa del aire (Poulson y White, 1969; Galán, 1993; Galán y Herrera, 1998). En las cuevas, las diferencias de temperatura y humedad relativa pueden alcanzar de 5-6 °C y 30% de humedad relativa respectivamente, observándose en cuevas ventiladas o en galeras (Trombe, 1952; Hoffmann *et al.*, 1986; Galán, 1993; Carabajal *et al.*, 1996, Galán y Herrera, 1998), dicha diferencia es causado por el movimiento activo del aire, el cual juega un rol importante para determinar la temperatura y humedad (Palmer, 2012).

I.1.2. Zonación en cuevas

Las cuevas, por su posición geográfica y geomorfológica no presentan fronteras estrictas (Galán, 1993). La zonación de los ambientes subterráneos, en caso particular, las cuevas y sus variaciones, consiste en delimitar arbitrariamente en base a la gradación de los parámetros físicos y bióticos (Galán y Herrera, 1998; Galán, 2004).

Generalmente, las cuevas poseen una zonación física característica. Comprende cuatro zonas distintas. Esta zonación abarca a los ambientes sub-superficiales y transicionales; y otras zonas que corresponde a los ambientes subterráneos propiamente dichos (Véase Figura 2). Las zonas se dividen en zona de entrada, zona de transición, zona ventilada y zona de aire en calma o profunda (Poulson y White, 1969; Galán y Herrera, 1998; Galán, 2004; Palmer, 2012).

La zona de entrada es la más superficial, está limitada hasta el nivel de luz visible y el área de penumbra. La luz que penetra puede variar, conforme la posición de la entrada o de las entradas y del movimiento del sol; su extensión es variable y caracterizándose por una gradación en los factores físicos (temperatura y humedad) y poca de material vegetal (plantas, tallos, hojas, etc.). En la zona de transición no hay presencia de material vegetal y se caracteriza por presentar variaciones climáticas, siendo una zona muy dinámica.



Figura 2. Zonación en cuevas, con cada una con las zonas físicas que las componen, delimitando a las cuevas en tres ambientes que varían en la estructura y composición de especies. Tomado de Galán y Herrera (1998).

Después de la zona de transición, continúa un área dentro de las cuevas donde las variables climáticas son poco cambiantes, la oscuridad es absoluta y la humedad suele ser más elevada que la del ambiente externo. En esta sección se distinguen dos zonas, una zona ventilada y una zona profunda. La primera zona comprende la mayor parte de las salas de las cuevas visitables por el ser humano y es donde se frecuenta la renovación del aire, mientras que la zona profunda,

el movimiento del aire es poco o nulo, y que corresponde a las condiciones climáticas descritas para los ambientes subterráneos, siendo ambientes estables en temperatura y una humedad relativa próxima a la saturación (Galán, 1993; Galán y Herrera, 1998; Galán, 2004; Palmer, 2012). La última zona presenta áreas que pertenecen a los distintos tipos de ambiente subterráneos que se clasificaron por Howarth (1983) donde distingue a tres clases de cavidades subterráneas de tamaño biológicamente significativas: macro-cavernas (mayores a 20 cm), meso-cavernas (0.1 a 20 cm) y micro-cavernas (menores de 0.1 cm). La primera admite el acceso a todos los vertebrados que se refugien, la segunda es caracterizada por presentar un microclima favorable para artrópodos cavernícolas, mientras que la tercera y última clase que es demasiado pequeña permitirá la presencia de ciertos grupos de artrópodos cavernícolas, y donde se desarrollarían algunas de sus fases larvarias (Galán, 1993; Carabajal *et al.*, 1996; Culver y Pipan, 2009; Romero, 2009).

I.2. Espeleología y su enfoque en las cuevas

La espeleología (del griego *spélaion*, cueva y *logos*, tratado o estudio) es la ciencia encargada de la exploración e investigación de las cuevas, cavernas o grutas (Palacios-Vargas, 1993a; Moore y Sullivan, 1997; Montero-García, 2000; Palmer, 2012).

Las cuevas han jugado un importante papel en la historia humana, ya que el hombre ha frecuentado las cuevas desde tiempos remotos. Nuestros antepasados utilizaron ampliamente las cuevas como vivienda o como refugio, proporcionando evidencias de su vasto uso, por la gran cantidad de artefactos desenterrados en las cuevas y por las variedades de pinturas rupestres que crearon. Sin embargo, el hombre abandonó estos sitios después de la última glaciación y para los tiempos modernos, la mentalidad sobre las cuevas cambió progresivamente (Palmer, 2012).

Durante la Edad Media, el cristianismo implantó la idea de que las cuevas eran las puertas al inframundo, sembrando miedo y desconcierto (Parson, 1968; Thomas, 1983; Galán, 1993). Por ello, la espeleología tuvo un gran rezago como ciencia.

En la actualidad, la espeleología ha incrementado considerablemente en el mundo y brinda una de las mayores aventuras para el conocimiento científico. Sin embargo lleva desarrollándose como ciencia moderna hace 120 años aproximadamente. Aunque el término es aún desconocido para la mayoría de las personas, la espeleología es una ciencia que permite acercarse a los

exploradores e investigadores a trabajar en conjunto, para adentrarse a lugares increíbles e inhóspitos que solamente podrían semejarse a los lugares creados por la imaginación (Racovitza, 1907; Galán, 1993; Montero-García, 2000; Sohn, 2016).

Con base a los ambientes subterráneos que hemos visto con anterioridad, las cuevas, cavernas y grutas son la base de la espeleología, siendo el área más destacable como ciencia. Además, la espeleología es frecuentemente considerada tanto deporte como una ciencia, siendo los exploradores los responsables de una gran cantidad de trabajos espeleológicos de campo, que ha permitido su avance como ciencia (Moore y Sullivan, 1997; Culver y Pipan, 2009; Palmer, 2012). Cientos de miles de cuevas se conocen en todo el mundo, y con el avance de las tecnologías y herramientas, los descubrimientos continúan día a día, permitiendo comprender su gran valor científico (Carabajal *et al.*, 1996; Moore y Sullivan, 1997; Martínez-Hernández, 2004; Palmer, 2012; Calva y Castillo-Gámez, 2014).

I.2.1. Espeleogénesis

El término espeleogénesis se refiere al origen y formación de las cuevas. Dicho origen y formación corresponde a una amplia variedad de fenómenos geomorfológicos en donde el tipo de roca, clima, fracturas y fallas tectónicas son los factores encargados de determinar la estructura y morfología de las cuevas. Debido a que los factores involucrados proporcionan muchas variedades de cuevas, su origen y estructura difiere considerablemente (Moore y Sullivan, 1997; Montero-García, 2000; Martínez-Hernández, 2004; Palmer, 2012).

Comúnmente, las cuevas se agrupan con base a su origen, ya sea que se hayan forman por procesos de disolución de la roca, durante una actividad volcánica, por deshielo, mediante procesos de erosión mecánica y de manera artificial, o de acuerdo al tipo de roca donde se desarrollan, por ejemplo, calizas, lava, granito, etc., siendo las cuevas de disolución en rocas de origen sedimentario las de mayor importancia porque son las más comunes (Núñez *et al.*, 1988; Moore y Sullivan, 1997; Culver y Pipan, 2009; Palmer, 2012).

Las cuevas formadas por disolución se forman por la acción disolutiva de las aguas subterráneas, ocasionadas por las filtraciones a través de los poros y fisuras de las rocas solubles. El agua es un agente importante para la formación de este tipo de cuevas, ya que el agua amplía las grietas disolviendo químicamente la roca y traslada el material disuelto, dando inicio a los

primeros pasos de la formación de una cueva (Hoffmann *et al.*, 1986; Moore y Sullivan, 1997; Montero-García, 2000; Martínez-Hernández, 2004; Culver y Pipan, 2009; Palmer, 2012).

Las cavidades formadas por acción disolvente del agua son las de mayor interés recreativo y científico, porque son cuevas que se han desarrollado durante millones de años, por lo que proveen de una vasta información del sitio en donde se formaron.

I.2.2. Cuevas kársticas

Las mayoría de las grandes cuevas tienen un origen vinculado principalmente a la acción del agua, siendo las más conocidas a nivel mundial (Ruíz-Castillo, 2006; Culver y Pipan, 2009; Palmer, 2012).

Las cuevas con este origen, generalmente se desarrollan en rocas calizas y otras carbonatadas (calcáreas y dolomías). Este tipo de rocas tuvieron su origen debido a la sedimentación de materia orgánica (restos de organismos) que se fueron acumulándose en el fondo marino, o a la precipitación química de carbonato de calcio y magnesio.

El proceso para la formación de este tipo de rocas consiste en la sedimentación de los materiales mencionados, en forma estratos o capas, generalmente arcillosas, que durante miles y millones de años, por la intervención de agentes físicos y químicos, después de que son depositados, son transformados en rocas en el subsuelo profundo, y que debido a la dinámica de la Tierra, son después emergidos o llevados a la superficie (Biosca, 1999; Grassi, 2000; Montero-García, 2000; Ruíz-Castillo, 2006).

La mayoría de las cuevas en roca caliza o carbonatas (cuevas kársticas) son en rocas que fueron formadas (depositadas) a principios del Cenozoico (entre 65-20 millones de años) y del Mesozoico (entre 250-65 millones de años). Sin embargo, pueden desarrollarse cuevas en rocas de más de 400 millones de años y menores a 10,000 años de edad (Renault, 1971; Grassi, 2000; Culver y Pipan, 2009).

Las regiones kársticas presentan un relieve, suelo, fauna y flora muy característicos, que permite ubicar las potenciales cuevas cercanas a este paisaje. Al conjunto de dichos rasgos característicos, que son los responsable de la morfología típica del karst, se le denomina paisaje

kárstico (Figura 3), utilizado al inicio por la región karst entre Italia y Eslovenia y empleando actualmente para paisajes similares.

El paisaje kárstico está conformado por una parte superficial, en donde se aprecian mogotes, dolinas y conos, y la sección hipógea o subterránea en donde se forman las cuevas (Núñez *et al.*, 1988; Espinasa, 1990; Martínez-Hernández, 2004; Trajano, 2000). Actualmente, el paisaje kárstico comprende aproximadamente el 15% de la superficie de la Tierra (White *et al.*, 1995; Culver y Pipan, 2009).

Las cuevas kársticas se forman principalmente cuando el agua meteórica disuelve roca caliza (CaCO_3) al filtrarse al subsuelo a través de fracturas, y excavando así drenajes y conductos subterráneos, por la disolución del mineral de calcita (CaCO_3), durante un proceso que normalmente toma millones de años. Sin embargo, la calcita difícilmente se disuelve en agua pura (Ruíz-Castillo, 2006; Palmer, 2012).

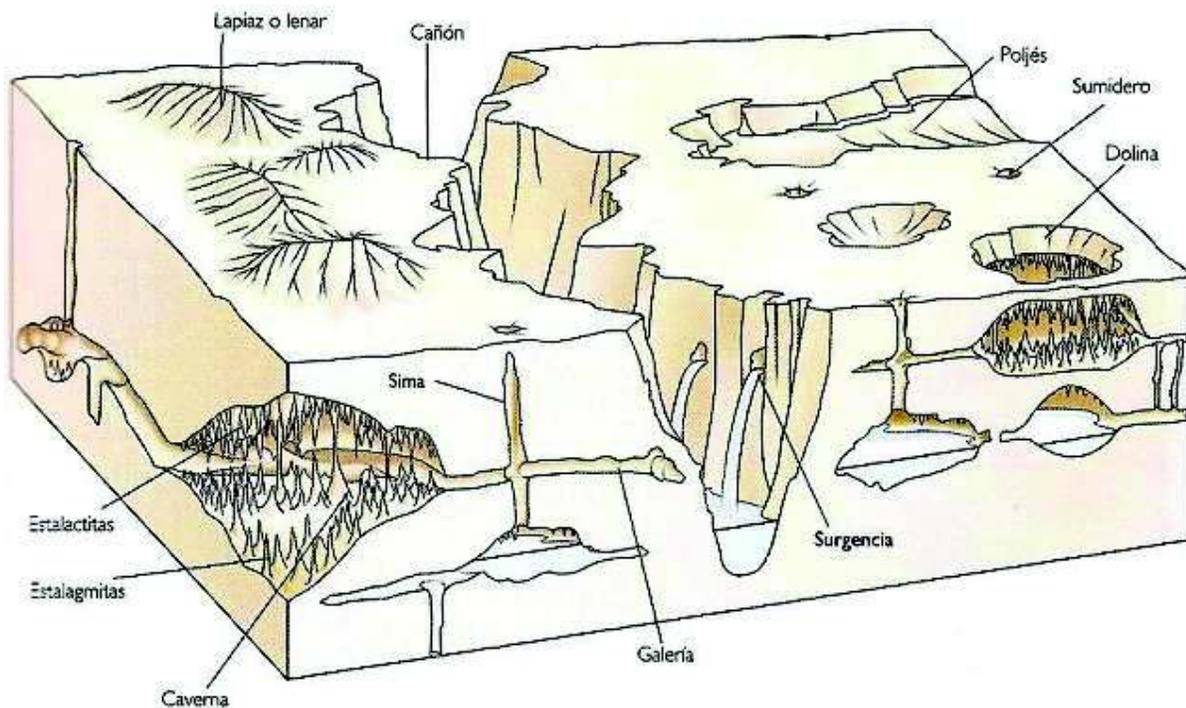


Figura 3. Modelo de un paisaje kárstico, observándose la parte superficial, en donde se aprecian cañones, lapiaz, poljés, sumidero, dolina y la sección subterránea en donde se forman las cuevas, galerías, estalactitas y estalagmitas, por mencionar algunas formaciones. Tomado de Calvo-Aldea *et al.* (2009).

El proceso fisicoquímico de la disolución de la roca, se debe a la solubilidad del carbonato de calcio (CaCO_3) en agua (H_2O) cargada de moléculas de dióxido de carbono (CO_2) y otros gases, que se combinan con ella para dar lugar a un ácido carbónico inestable (H_2CO_3), que actúa como soluto. Dependiendo de la roca, la porosidad y el aporte del ácido carbónico se forma bicarbonato soluble (HCO_3^-), el cual puede disociarse ligeramente en el agua (Moore y Sullivan, 1997; Grassi, 2000; Ruíz-Castillo, 2006; Culver y Pipan, 2009; Palmer, 2012).

I.3. Bioespeleología

Con las exploraciones en las cuevas, se ha descubierto que existen infinidad de grupos de organismos desde unicelulares hasta los más complejos, que pueden llegar a estar ahí de manera temporal o permanente. La ausencia o presencia de organismos en una cavidad depende de muchos factores como las dimensiones de la cavidad, presencia de cuerpos de agua, la humedad del sitio, la falta de productores primarios, por mencionar algunas. Por otra parte, hay organismos que están en el interior por un lapso de tiempo para protegerse de las tempestades o escapar de algún depredador (Viré, 1904; Montero-García, 2000; Culver y Sket, 2000; Sket, 2008; Culver y Pipan, 2009; Romero, 2009).

Las cuevas son interpretadas como un ecosistema subterráneo que se caracteriza por ser limitante, cada uno de los organismos que habitan temporal o permanente tienen un rol en la sobrevivencia y adaptación al ambiente. Las adaptaciones a los factores que condicionan la vida en los ambientes subterráneos son ejemplo de la co-evolución de las especies a su hábitat. Su singularidad es tal, que se ha hecho necesaria una especialidad que los estudie denominada bioespeleología (Viré, 1904; Galán 1993; Galán y Herrera, 1998; Hoffmann *et al.*, 1986; Carabajal *et al.*, 1996; Palacios-Vargas *et al.*, 2014a).

I.3.1. Diversidad biológica de las cuevas

La diversidad biológica dentro de las cuevas es muy vasta. Según Culver y Sket (2000) el rápido incremento de esta información ha permitido la detección de sitios de alta diversidad (hotspots), siendo las cuevas y los otros ambientes subterráneos beneficiados. Inventarios sobre especies que habitan cuevas son publicados por muchos países, principalmente en *Stygofauna Mundi* y

la *Encyclopaedia Biospeologica*. Además de trabajos sobresalientes sobre grupos colectados en diferentes regiones de Europa y en Estados Unidos de América (Mitchell y Reddell, 1971; Belles, 1987; Holsinger y Culver, 1988; Bole *et al.*, 1993). Sin embargo, los sitios de alta diversidad que Culver y Sket (2000) reportan se enfocan en Europa y en Estados Unidos de América, áreas donde los ambientes templados que poseen presentan una baja diversidad exterior y por ende, el número de especies en cuevas es relativamente menor a pesar del número de cuevas que poseen. Existen trabajos similares para regiones tropicales (Peck y Finston, 1993; Galán y Herrera, 1998; Deharveng y Bedos, 2000; Palacios-Vargas *et al.*, 2014a) y regiones áridas (Calvin-Welbourn, 1999) pero su investigación no se ha desarrollado a comparación de las regiones templadas (Culver y Pipan, 2009; Romero, 2009). Por ello, aún existe una infinidad de cuevas y especies por descubrir.

La biodiversidad que reside en estos ambientes corresponde a todos los taxones descritos (Juberthie y Decu, 1994). Esta diversidad se debe a los distintos nichos que proporcionan los ambientes subterráneos (Palacios-Vargas, 2001). En ellas no solo encontramos fauna, sino también flora y algas que son típicas o exclusivas de las zonas sub-superficiales y de transición (Culver y Pipan, 2009; Romero, 2009). Además de los organismos mencionados anteriormente y que son los más estudiados, existen otros grupos de microorganismo que habitan en el medio subterráneo que son arqueobacterias, bacterias, hongos y protistas, que a pesar de su escaso estudio, se ha encontrado el papel que juegan tanto para el ambiente donde habitan como para los organismos con los que conviven. Su rol ecológico radica en ser los recursos energéticos para las especies cavernícolas y responsables de la modificación de las estructuras de las cavernas o cuevas. (Moore y Sullivan, 1997; Romero, 2009; Sigala-Regalado *et al.*, 2011).

Las cuevas hospedan una gran cantidad de especies, desde microorganismo y especies complejas, donde cada uno beneficia a las cavidades y con frecuencia presentan un alto grado de endemismo, a menudo se puede encontrar una especie endémica en un sistema de grutas o en una sola cavidad (Palacios-Vargas, 2001).

Los taxa de mayor interés en el estudio de la biología de las cuevas corresponden a la fauna, encontrándose especies acuícolas, marinas y mayormente terrestre (Mitchell y Reddell, 1973; Reddell, 1977; Hoffmann *et al.*, 1986; Carabajal *et al.*, 1996; Palacios-Vargas *et al.*, 2014a). La diversidad de especies que residen en cuevas involucra invertebrados como esponjas,

platelmintos, nemátodos, moluscos y artrópodos, por mencionar algunos. En los grupos de vertebrados existe, al menos en cada grupo, una especie que habita de manera permanente en las cavidades subterráneas (Galán y Herrera, 1998; Culver y Pipan, 2009; Romero, 2009; Palacios-Vargas *et al.*, 2014a).

El grupo de los artrópodos es de los más estudiados debido a las adaptaciones que han desarrollado para establecerse de manera permanente en los ambientes subterráneos, reflejándose en el incremento de las publicaciones sobre nuevas especies cavernícolas en los últimos años (Howarth, 1983; Hoffmann *et al.*, 1986; Galán, 2004; Hoffmann *et al.*, 2004).

De los vertebrados residentes más conocidos y de mayor importancia, el Orden Chiroptera (murciélagos) encabeza al grupo que más residen en las cavidades subterráneas. Cerca de la mitad de los géneros descritos de murciélagos usan este ambiente. Más de 200 especies se han registrado como visitante regulares de cuevas a nivel mundial. (Hoffmann *et al.*, 1986; Simmons, 2005; Cruz, 2008; Romero, 2009). Pero los murciélagos no son los únicos que se adentran a las cuevas, ya que existen registros de especies de peces, anfibios, reptiles, aves y otros mamíferos que se encuentran en las cuevas de manera temporal o permanente, e inclusive especies que han desarrollado adaptaciones para habitar en las zonas profundas de las cuevas (Racovitza, 1907; Vandel, 1965; Hoffmann *et al.*, 1984; Romero, 2009; Palacios-Vargas *et al.*, 2014a).

I.3.2. Clasificación ecológica de la fauna cavernícola

La diversidad biológica dentro de los ambientes subterráneos es compleja debido a su heterogeneidad. La fauna es la de mayor estudio dentro de la rama de la bioespeleología como consecuencia de las adaptaciones que han desarrollado las especies para habitar dicho ambientes. El término fauna cavernícola hace referencia a toda especie que habita temporal o permanente dentro de los ambientes subterráneos (Culver & Pipan 2009; Romero 2009), por lo que se encuentran desde estadios larvarios de ciertos invertebrados, microartrópodos, invertebrados y vertebrados de gran tamaño (Galán 1993, Culver & Sket 2000; Hoffmann *et al.* 2004; Romero 2009; Palacios-Vargas *et al.* 2014a). Racovitza (1907) menciona que la heterogeneidad de la fauna encontrada dentro de las cuevas es tan diversa que lo único que tienen en común es el hábitat en sí.

Una de las primeras clasificaciones estuvo basada en el uso de la cueva, siendo separados como especies temporales o permanentes, siendo las especies temporales clasificadas por casualidad o accidente. Por supuesto, una gran variedad de animales utilizan las cavidades para evitar las tempestades, escapar del calor del verano, para hibernación, para construir sus nidos, entre otras necesidades (Culver y Pipan, 2007). La lista de mamíferos, aves, reptiles, anfibios, peces, artrópodos (que son los habitantes temporales más comunes) es bastante grande incluyendo animales domésticos como salvajes, que independientemente del uso que le den a las cavidades, contribuyen a la limitada cadena trófica (Mitchell y Reddell, 1973; Hoffmann *et al.*, 1986; Culver y Pipan, 2007; Romero, 2009).

Las especies permanentes, eran aquellas que completaban su ciclo biológico dentro de las cuevas, sin embargo se observaron que había poblaciones de la misma especie que se desarrollan su ciclo dentro o fuera de las cuevas, por lo que se desechó su uso (Culver y Pipan, 2007; Romero, 2009).

A partir de ahí, se han propuestos varios sistemas de clasificación ecológica de la fauna (Schiner, 1854; Racovitza, 1907; Vandel, 1965; Barr, 1968; Peck, 1970), siendo el Schiner-Racovitza uno de los más utilizados en la actualidad representado tres grupos principales: troglobio, troglófilo y troglóxeno. Sket (2008) propone una redefinición de los grupos propuestos anteriormente, debido al uso de sinonimias y dificultad de identificar a que categoría pertenecen las especies con afinidad a ser troglófila. La clasificación propuesta por Sket (2008) reconoce cuatro grupos: troglobio, eutroglófilo, sub-troglófilo y troglóxeno.

Las dos primeras corresponden a las especies fuertemente ligadas a los ambientes subterráneos, habitando en las secciones más profunda, con las típicas condiciones ambientales y con adaptaciones para subsistir en este ambiente. Siendo considerados los troglobios como los verdaderos cavernícolas ya que han desarrollado una serie de adaptaciones morfológicas, fisiológicas y etológicas para habitar en dichos ambientes subterráneos.

Los eutroglófilos son especies que han desarrollado características morfológicas a los ambientes subterráneos, típicamente alargamiento de apéndices para el caso de los artrópodos, se encuentran en las zonas profundas de las cuevas y puede presentar una población dentro de la cueva y otra fuera de la cueva (Sket, 2008).

Los subtroglófilos son especies que pueden penetrar las cuevas ya que presentan adaptaciones al ambiente nocturno, y desarrollan parte de su ciclo de vida dentro de ellas. Algunas especies subtroglófilas son contribuyentes al ambiente subterráneo, ya que proveen de alimento para otras especies. Por último, se encuentra la categoría de los troglófitos siendo especies que no poseen ninguna adaptación al ambiente subterráneo, ni a moverse en la oscuridad. Se encuentra asociado a las primeras zonas de las cuevas, principalmente a la entrada y son especies que utilizan a las cuevas como sitios de refugios u de manera accidental (Sket, 2008).

No todas las cuevas presentan especies pertenecientes a las cuatro categorías, pero su relación con el ambiente subterráneo las configuran como una entidad ecológica, en donde intervienen una serie de factores, abióticos y bióticos, como las dimensiones de la cueva, los factores climáticos, físicoquímicos y tróficos, además de la interacción de las diferentes poblaciones entre sí (Galán, 1993; Galán y Herrera, 1998; Galán, 2004; Romero, 2009). A esto se le denomina como ecosistema subterráneo, el cual es posible comprender su estructura y funcionamiento debido al tamaño de las cuevas y sus limitadas fuentes tróficas (Galán, 1993; Culver y Pipan, 2009; Romero, 2009).

I.3.3. Factores abióticos que condicionan la vida en cuevas

Al descubrir que la vida se presenta en este ambiente tan limitante, se consideró el estudio de los factores que condicionan su permanencia. La ausencia de luz, la elevada humedad relativa, y la estabilidad del ambiente, ligados a la escasez de fuentes de alimento, y la ausencia de depredadores, constituyen los principales factores que determinan la presencia y ausencia de las especies faunísticas. Dichos factores influyen en el ambiente subterráneo terrestre y/o acuático que condicionan a la diversidad, y además a las adaptaciones que han adquirido (Hoffmann *et al.*, 1986; Galán, 1993; Galán y Herrera, 1998; Romero, 2009).

La ausencia de luz es un factor constante. Obviamente, cuando las cuevas presentan entradas de muy amplias dimensiones, la luz puede penetrar cierta distancia y existirá un área de penumbra en la proximidad de la entrada, sin embargo en el interior de las cuevas, la oscuridad es absoluta. Dicha oscuridad total, impide la fotosíntesis por parte de las especies

autótrofas, obteniendo como resultado la ausencia de plantas verdes al ambiente subterránea (Galán, 1993; Galán y Herrera, 1998; Romero, 2009; Palmer, 2012).

Por ende, las especies cavernícolas tiene que explotar otras recursos energéticos (Vandel, 1964). La luz juega un papel fundamental en la colonización de las especies al ambiente subterráneo, ya que pueden ser atraídos o repelidos por la luz (Palmer, 1991; Galán, 1993; Carabajal *et al.*, 1996). Especies muy adaptadas a los ambientes subterráneos desarrollan fototropismo negativo, permitiendo ser empleados como indicadores para delimitar las zonas correspondientes al ambiente subterráneo. La elevada humedad relativa es una de las características más comunes del ambiente subterráneo, presentándose próximo a la saturación (Moore y Sullivan, 1997; Galán, 1993; Galán y Herrera, 1998)

Ciertas especies presentan una intolerancia a la desecación, por lo que la disminución de humedad dentro del ambiente subterráneo puede matar a especies cavernícolas por la deshidratación o restringirlas a ciertas zonas de las cuevas (Hawes, 1939; Jeannel, 1946; Galán, 1993). Caso particular son los artrópodos, que poseen una gran flexibilidad ecológica para mantenerse en diferentes medios, siempre que la humedad sea elevada, por ellos son los principales colonizadores de las cuevas, encontrándose en todo su interior (Galán, 1993).

Otro factor, es la estabilidad del ambiente subterráneo, observándose principalmente con la persistencia de una temperatura sin drásticas oscilaciones. La temperatura del aire en el interior de las cuevas experimenta una escasa variación a lo largo del año, comprendido entre 0.5 y 2 °C, la cual puede limitar la abundancia de ciertas especies (Gers, 1995; Galán, 1993; Galán, 2010).

I.3.4. Factor biótico que condiciona la vida en cuevas

Los recursos energéticos de la mayoría de las cavidades subterráneas son transferidos de la superficie hacia el ambiente interno. Esta dependencia de las fuentes de energía externas generalmente significa que hay menos recursos disponibles en los ambientes subterráneos y la variedad de dichos recursos es bajo (Culver y Pipan, 2007; Culver y Pipan 2009). El mayor ejemplo notable de esta fuente de alimento para cuevas terrestres son los murciélagos y de hecho, distintas comunidades de organismos están especializados en el guano de murciélago (Gnaspini y Trajano, 2000).

El empleo de estas cuevas por parte de los murciélagos, se debe a que son refugios idóneos para descansar, conservar energía y reproducirse, sin embargo las estructuras de los ambientes subterráneos ofrece una importante diversidad de formaciones como excavaciones laterales, grietas en las paredes y depresiones en el techo, favoreciendo la colonización y especiación por parte de diversas especies con necesidades básicas diferentes (Cruz, 2008; Romero, 2009).

Por ello, una cueva es posible encontrar a una sola especie o varias especies ocupando el mismo hábitat y pueden albergar miles de millones individuos, mientras que otras cavidades solo soportaría grupos pequeños independientemente de sus dimensiones (Cruz, 2008; Medellín *et al.*, 2008; Romero, 2009; Damino, 2012). Por ello, no sorprende que los murciélagos sean uno de los mejores indicadores ecológicos para determinar el estado de salud del ambiente e influyentes en las cadenas tróficas del ambiente subterráneo.

Muchas especies de murciélagos pueden usar las cavernas y cuevas naturales o artificiales (Arita, 1996; Ávila-Flores y Medellín, 2004), y la mayoría de estos hábitats pueden presentar varias especies habitando una misma cavidad. Por ello, la diversidad de murciélagos y el tamaño de la población pueden fluctuar en diferentes estaciones (Furman y Ozgul, 2002; Parsons *et al.*, 2003; Galindo *et al.*, 2004), dando como resultado una diversificación de recursos energéticos en ciertos ambientes. También influyen en la distribución espacial de las cavidades, ya que se pueden encontrar en la entrada o en las áreas más profundas (Arita y Vargas, 1995; O'Donnell, 2002).

Al ser las especies más dominantes de este medio, juegan un papel importante en la estructura de las comunidades y convirtiéndose en los principales acarreadores de nutrientes, debido a sus hábitos alimenticios tan variados y por las grandes acumulaciones de guano que pueden generar. La variedad del alimento y su degradación, así como la fauna que interviene para ello dependen de los hábitos de los murciélagos. Por ello, se ha especulado que la fauna cavernícola puede vivir debido al recurso energético que proporciona el guano de los murciélagos, siendo la base de las cadenas tróficas de los ambientes subterráneos terrestres (Palacios-Vargas, 2001; Culver y Pipan, 2009; Romero, 2009). Inclusive se ha reportado que la remoción o alteración de la colonia de murciélago dentro de una cueva conduciría a la extinción del 94% del total de la fauna encontrada en una cueva (Aguilar-Morales y Ruíz-Castillo, 1995).

I.4. Espeleología en México

Últimamente ha habido una creciente conciencia y preocupación por la biodiversidad alrededor del mundo. Libros y publicaciones con un enfoque a la biodiversidad han aparecido y existe un rápido aumento en la cantidad de información disponible acerca de los patrones de la biodiversidad para muchos grupos de organismos (Wilson, 1992; Master *et al.*, 1998; Molina-Freaner y Van Devender, 2010).

Desde el punto de vista espeleológico, México es uno de los países más interesantes del mundo, ya que en casi todos los estados de la República existen cavidades de distinta composición, tamaño y origen. Alrededor del 20% del territorio nacional es propicio para la formación de cavidades (Espinasa, 1994). Lazcano (1983) calcula que existen más de siete mil cavernas y cuevas en el país. Aunque en términos numéricos, Europa y Estados Unidos superan a México en las exploraciones y número de cavidades subterráneas registradas en el mundo, en términos de especies, México representa una gran diversidad de especies tanto temporales y cavernícolas (Reddell, 2005; Culver y Pipan, 2009; Romero, 2009; Palacios-Vargas *et al.*, 2014a). Muchas de estas cavidades han sido estudiadas por geólogos y muchas más por espeleólogos con fines deportivos. Comparativamente son pocas las que han sido exploradas con fines biológicos.

I.4.1. Estudios bioespeleológicos en México

México tiene una de las faunas cavernícolas más rica y diversa que cualquier región del mundo. Esto ha sido explicado en parte por la existencia de vastos sistemas de cuevas, ubicadas en una gran variedad de hábitats como son desiertos, bosques, de alta montaña, matorrales, selvas, entre otros tipos (Mitchell y Reddell, 1973; Reddell, 1977; Palacios-Varga *et al.*, 1985; Palacios-Vargas, 1993b; Aguilar-Morales y Ruíz-Castillo, 1995; Hoffmann *et al.*, 2004, Reddell, 2005; Reddell, 2006; Bribiesca-Contreras y Solís Marín, 2014; Palacios-Vargas *et al.*, 2014a).

En México, se han localizado más de 2,000 especies, entre mamíferos, aves, reptiles, anfibios, peces, insectos, arácnidos, crustáceos, entre otros invertebrados que utilizan o viven en cuevas (García-Montero, 2000; Palacios-Vargas *et al.*, 2014a). El grupo de los artrópodos, son, desde luego, los más abundantes con un registro de 1,935 especies que recurren a este tipo de ambientes subterráneos, estando en primer lugar los insectos, con 816 especies, siguiendo los

arácnidos con 478 especies y en tercer lugar los ácaros con 273 especies, pero al mismo tiempo son los que se han estudiado menos por su gran diversidad y complicada determinación (Hoffmann *et al.*, 2004).

I.5. Situación actual de la espeleología en Sonora

El estado de Sonora es una región rezagada en la espeleología, en donde a comparación del conocimiento generado para las cavidades del centro y sur del país, representa el 1.2% del conocimiento actual en México, siendo que la evolución geológica y la variedad de ecosistemas que se presentan en el estado, son propicias para la formación de una gran variedad de cavidades subterráneas de gran valor biológico y cultural (Calva y Castillo-Gómez, 2014).

I.5.1. Bioespeleología de Sonora

La espeleología sonorenses es de muy reciente formación ya que no existía una institución o grupo de trabajo que se enfoque en este tipo de ambientes. Sin embargo, históricamente, si se han generado, aleatoriamente, ciertos mapas de cavidades de Sonora, así como una breve referencia en distintas publicaciones o libros sobre fauna albergada en las cuevas del estado de Sonora.

En cuestión de mapas, pocas son las cuevas que han sido cartografiadas y su mayoría por grupos extranjeros. La Association for Mexican Cave Studies (AMCS) posee 10 mapas de cuevas y 2 minas en Sonora. La Cueva La Morita de Naco, Sonora, es la única cueva en donde el mapa fue realizado por los espeleólogos mexicanos, Sergio Santana y Enrique Méndez.

Caire (1978) en su tesis doctoral sobre la zoogeografía de mamíferos de Sonora, registra la presencia de murciélagos dentro de cuevas entre 1920 y 1930, siendo la publicación más antigua donde se menciona una cueva para Sonora con fauna dentro de ellas.

Después de varios años se menciona una cueva para Sonora correspondiente al trabajo de Villa y Cockrum (1962), enfocado a la migración del murciélago guanero *Tadarida brasiliensis mexicana*, donde se menciona a la Cueva El Tigre en Carbó, Sonora y el trabajo consistía en la estimación de la población de dicha especie dentro la cueva. Un año después, Cockrum y Bradshaw (1963) emplearon la misma información del murciélago guanero para unas reseñas

sobre mamíferos de Sonora. En ambos trabajos, se reportaron otras especies de murciélagos que usan esta cueva como refugio, predominando *Natalus mexicanus*, *Myotis velifer*, *Macrotus californicus*, *Mormoops megalophylla*, *Pteronotus davyi* y *Leptonycteris nivales*; esta última en estado de conservación de amenazada en la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza y de igual forma, catalogada como amenazada en la NOM-059-SEMARNAT-2010 en México. Posteriormente Mitchell (1964) fue el primero en trabajar con los aspectos ambientales dentro de la Cueva El Tigre, en donde incluía datos puntuales durante un año (1961-1962) sobre la temperatura, humedad relativa y concentración de amonio dentro de la cueva, siendo la primera descripción del entorno físico de la cueva. Después de varios años, McFarlane y colaboradores (1995) miden de manera puntual la concentración de amonio de la Cueva El Tigre, encontrando concentraciones de hasta 1779 ppm en ciertas secciones de la cueva, principalmente cuando la población del murciélago guanero *Tadarida brasiliensis* incrementa, siendo dichos niveles de concentración de amonio un riesgo para la salud humana.

Hoffmann y colaboradores (2004), en su capítulo “Los artrópodos de las cavernas de México” mencionan cuatro cavidades con registro de artrópodos para el estado de Sonora, siendo de nuevo la Cueva El Tigre referencia, pero incorporando la Cueva Higuera y dos minas abandonas (Minas Nuevas y Mina La Aduana).

Palacios-Vargas y colaboradores (2014a) realizaron recientemente una enciclopedia bioespeleológica en donde aparecen mencionadas varias cuevas con registros de murciélagos para Sonora, sin embargo, no especifica que cuevas o su localidad.

Los reportes obtenidos de estudios de la fauna en cuevas, las especies que ha sido estudiada en el estado, que potencialmente habita en cavidades subterráneo corresponden a los murciélagos. Para México se han citado más de 100 especies de quirópteros que emplean este medio como refugio (Hoffmann *et al.*, 1986; Simmons, 2005; Cruz, 2008). En Sonora, el grupo más diverso de mamíferos terrestre después de los roedores es el orden Chiroptera representando el 32% del total de mamíferos del estado, siendo el segundo grupo con mayor número de especies. El total de especies de murciélagos para Sonora corresponde a 38 especies representadas en 7 familias y 22 géneros (Castillo-Gómez *et al.*, 2010). Sin embargo, el enfoque de estudio de los murciélagos en el estado es acerca de su función ecológica por sus hábitos alimenticios específicamente acerca de su papel como polinizadores (Peñalba *et al.*, 2006; Cruz,

2008) y la localización de los sitios donde se refugian con la finalidad de conocer la etapa de vida en que se encuentra, el tamaño de las poblaciones, su distribución y el listado de las especies que existen para el estado (Medellín *et al.*, 2008; Palacios-Vargas *et al.*, 2014a).

Por ello, en Sonora no se ha realizado estudios con enfoque bioespeleológico de la fauna que habita dentro de los ambientes subterráneos y aunando a esto, no se ha documentado el papel que desempeñan las especies de quirópteros en ambientes subterráneos terrestres.

II. HIPÓTESIS

La fauna que reside en cuevas terrestres está determinada por los factores físicos de la propia cueva y de los recursos energéticos que proveen la superficie o la actividad de ciertas especies. Dichos factores presentan una variación espacial y temporal dentro de las cuevas, modificando la diversidad faunística cavernícola. Por ello, las condiciones climáticas internas y el guano producido por las poblaciones de murciélagos presentes en la Cueva de la Mariana y Cueva El Tigre, determinan la riqueza y abundancia de las especies faunísticas cavernícolas.

III. OBJETIVOS

III.1. Objetivo general

Determinar los factores abióticos y bióticos que influyen en la diversidad faunística de la Cueva de la Mariana y Cueva El Tigre de la región central del estado de Sonora.

III.2. Objetivos particulares

- Caracterizar las zonas físicas de la Cueva de la Mariana y Cueva El Tigre mediante la cartografía y la medición de temperatura y humedad relativa del interior de ambas cuevas.
- Determinar la(s) principal(es) fuentes de energía externa dentro de ambas cuevas.
- Estimar la riqueza y abundancia relativa de especies de fauna de ambas cuevas.
- Correlacionar los factores abióticos y bióticos encontrados con la diversidad faunística presente en la Cueva de la Mariana y Cueva El Tigre.

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

IV.1. Descripción de las áreas de estudio

Las cuevas se encuentran ubicadas entre las localidades de San Miguel de Horcasitas y Carbó del estado de Sonora. Se localizan a aproximadamente a 13.5 km al noroeste de San Miguel de Horcasitas y 18 km al sureste de Carbó. La entrada a la Cueva El Tigre se ubica en las coordenadas $29^{\circ} 34' 32.2''$ N y $110^{\circ} 49' 13.8''$ O, mientras que la Cueva de la Mariana se localiza a $29^{\circ} 35' 25.9''$ N y $110^{\circ} 48' 8.9''$ O (Figura 4).



Figura 4. Ubicación de la Cueva El Tigre y la Cueva de la Mariana con respecto a los poblados de San Miguel de Horcasitas y Carbó del estado de Sonora. Elaborado por Karen Bustamante (2016).

El ambiente de la superficie en donde se ubican las cuevas presenta un clima cálido, muy seco BW(h')hw(e') con una temperatura media anual máxima de 30.5 °C y mínima de 17.4 °C. Las precipitaciones se presentan durante los meses de julio a septiembre, con una precipitación media anual de 294 mm (García, 1988; Armienta *et al.*, 2011).

Geológicamente, el área que abarcan la Cueva El Tigre y la Cueva de la Mariana corresponde al periodo Proterozoico tardío y Cámbrico temprano (hace más de 500 millones de años), siendo una de las unidades más antiguas registradas para Sonora (Figura 5). En esta área, las rocas están representadas por una secuencia de sedimentos de origen terrígeno y marinos compuestos principalmente por rocas como dolomía, caliza dolomítica, arenisca y cuarcita (Armienta *et al.*, 2011).

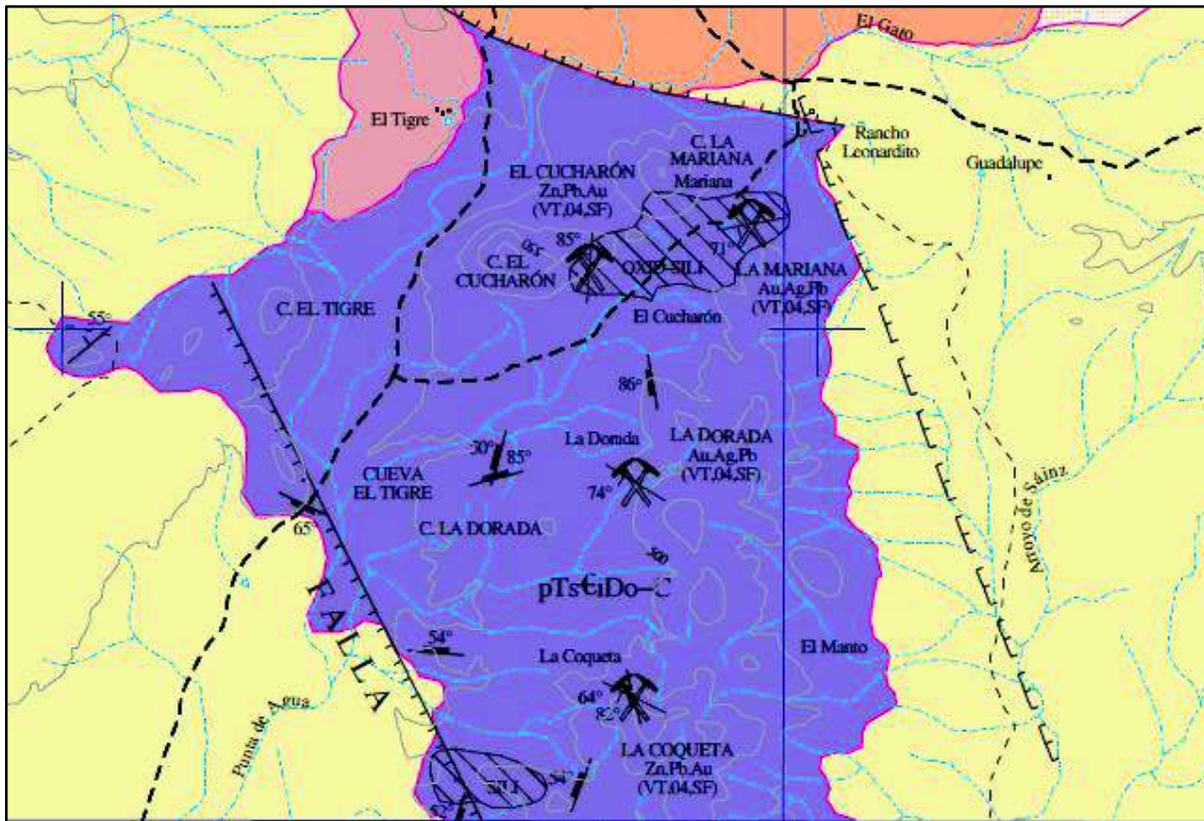


Figura 5. Sección de la Carta Geológica-Minera de Carbó H12-D21, se aprecia en tono morado el área de dolomía-cuartiza del periodo Proterozoico y Cámbrico en donde están ubicadas la Cueva El Tigre y la Cueva de la Mariana. Se puede observar además, que la Cueva El Tigre está registrada por el Servicio Geológico Mexicano, mientras que en el Cerro de la Mariana no existe información sobre la cueva. Fuente: Servicio Geológico Mexicano (2012).

IV.2. Cartografía de la Cueva de la Mariana y Cueva El Tigre

Se hizo una descripción de la cartografía de las cuevas mediante el uso de un distanciómetro LD 500 (STABILA), un hipsómetro 1000 LH (Optic-Logic), una cinta métrica de 50 metros y un inclinómetro (AIMFAST AF1), la cual combina una brújula magnética con marcación de 0° a 360° con una precisión de $\pm 0.5^\circ$ e inclinómetro que muestra de 0° a 90° o de 10% a 150% de inclinación.

Se emplearon distintos puntos de referencia, de la manera más lineal posible a la estructura de las cuevas, empezando desde la entrada de cada cueva hasta el sitio más profundo al que se pudo acceder. El número de puntos variaron por la dimensión y estructuras de las cavidades considerando solamente los lugares donde fue posible adentrarse sin complicaciones. En cada punto, se utilizaron las herramientas de medición mencionadas anteriormente para tomar los siguientes datos: número de punto de referencia, distancia entre cada uno de los puntos de referencia, azimut, inclinación, eje vertical al punto de referencia y eje horizontal del mismo.

Para generar el mapa de las cuevas primeramente se empleó el software VisualTopo (versión 5.04) en el que se agregaron los datos obtenidos de las exploraciones en la hoja del programa con la finalidad de generar un bosquejo de la estructura de las cuevas. En base a esto, se procedió a generar un bosquejo con la simbología más característica de ambas cavidades empleando la lista de símbolos oficiales (Survey and Mapping Working Group, 1999) de la Unión Internacional Espeleológica (UIS, por sus siglas en francés). Para agregar los símbolos presentes en las cavidades, se empleó el programa Inkscape (versión 0.48.4), en el cual se utilizó el bosquejo para generar el mapa de ambas cuevas.

IV.3. Caracterización de las zonas físicas de las cuevas

IV.3.1. Temperatura y humedad relativa de las cuevas

Los datos climáticos internos de ambas cuevas se registraron mediante cuatro sensores (Arduino Data Logger), diseñados y creados por el M. en C. Clément Ronzon para soportar condiciones adversas presentes en las cuevas y de bajo costo. Los sensores utilizados poseen un sensor BMP189 encargado de registrar la temperatura (en grados centígrados) y presión absoluta (mb)

y otro sensor tipo SI702, que registra la temperatura (en grados centígrados) y humedad relativa del aire (%) del lugar (Figura 6).

Se colocaron dos sensores por cueva, colocándose después del área de la penumbra y en las áreas más profundas de ambas cuevas. Los sensores se colocaron sobre un soporte de 1.20 m de largo, y se fijaron a una altura de 0.80 m, con la finalidad de que los datos no se alterarán con la descomposición del guano y reflejará los valores de clima de la atmósfera de las cuevas.

La frecuencia del muestreo de los sensores fue cada hora durante un año de estudio (11 de abril de 2015 al 12 de abril de 2016).

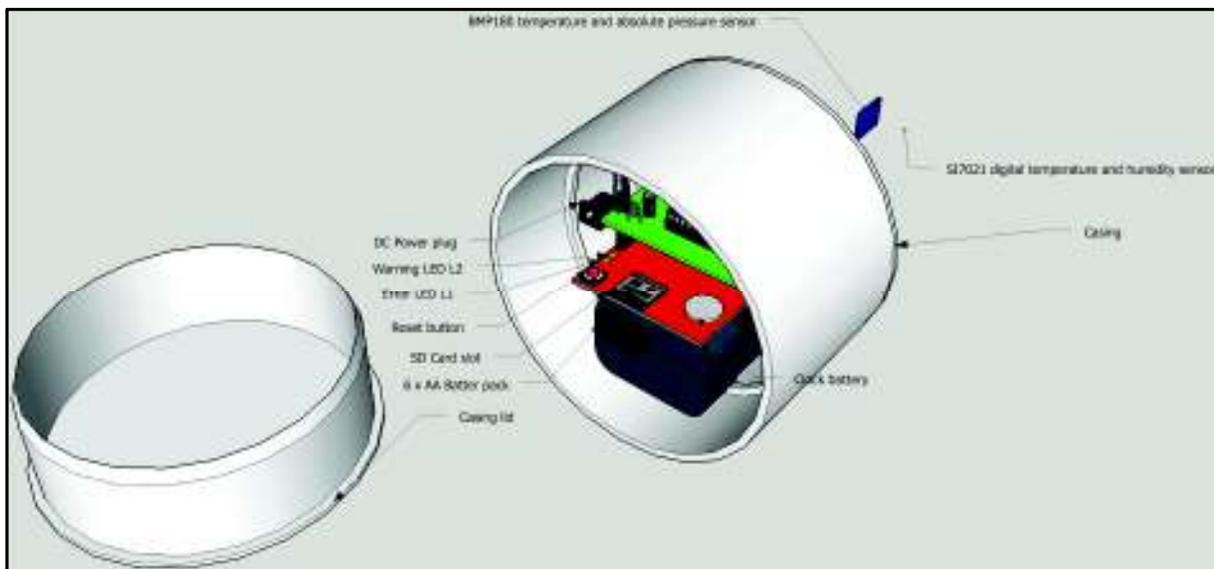


Figura 6. Esquema del sensor Arduino data logger diseñado y creado específicamente para esta investigación.

IV.4. Colecta y preservación de fauna cavernícola

Para cumplir con los objetivos de estimación de la riqueza y abundancia dentro de ambas cuevas, se realizaron distintas metodologías dependiendo del grupo de interés. En el caso de los invertebrados las colectas se hicieron con base a tres métodos diferentes, donde posteriormente, los especímenes fueron preservados en frascos color ambar con capacidad de 25 ml, con alcohol al 70%. Para los vertebrados, las metodologías fueron tres métodos distintos. A diferencia de la preservación de los ejemplares de invertebrados, los vertebrados fueron colectado e identificados en “*in situ*”.

Debido a que la fauna cavernícola poseen una baja densidad a comparación del ambiente externo, las colectas fueron poco agresivas, es decir, al inicio de la investigación se colectaron los ejemplares que se obtenían y conforme fue avanzando dicha investigación, solo se colectaban ejemplares que se requerían para su identificación total, en caso de que no estuviera completo o nuevos ejemplares.

Para la identificación de la fauna encontrada se utilizaron bibliografías especializadas para cada grupo presente (Stebbins, 1985; Borror y White, 1998; Koç, 1998; Russell y Monson, 1998; Gerson *et al.*, 1999; Aranda, 2000; Sibley, 2003; Hoffmann *et al.*, 2004; Ceballos & Oliva 2005; Kaufman, 2005; Armas, 2006; Reid, 2006; Elbroch, 2006; Kays y Wilson, 2009; Cupul-Magaña, 2011; Foelix, 2011; Rengifo-Correa y González, 2011; Palacios-Vargas *et al.*, 2014b) o con expertos de diferentes Institutos hasta el mínimo taxón posible. Referencias adicionales para grupos taxonómicos serán incluidas en los respectivos apartados que se empleen.

IV.4.1. Invertebrados cavernícolas

Los muestreos se realizaron durante un año, que comenzó del 11 de abril de 2015 al 12 de abril de 2016, y se trabajo en las diferentes salas encontradas dentro de cada una de las cuevas. Los muestreos fueron tres veces por mes durante el periodo del estudio. Cada ejemplar se etiquetó con la siguiente información: fecha, localidad, número de registro, zona física en la que fue colectado, nombre de la sala, método empleado para su colecta y biotipo en el que se encontró (estalagmita, estalactitas, guano, roca, suelo, agua, etc.).

IV.4.1.1. Fauna asociada al guano

Para la fauna asociada al guano, se tomaron tres muestras al azar en cada una de las principales salas en donde se registrará la presencia de murciélagos perchando.

Para la recolección del guano se utilizaron recipientes con una capacidad de un litro, colectado a una profundidad de 5 cm y se depositaron en bolsas transparente selladas para su transporte al laboratorio.

Para separar la fauna del guano se utilizó el método de Berlese-Tullgren (Palacios-Vargas y Mejía-Recamier, 2007). Este método utiliza el principio del fototropismo negativo, por el cual,

la fauna al tratar de escapar de los cambios que se generan en la muestra, atraviesan las malla que se encuentra en el embudo y resbalan por sus paredes hasta caer en un frasco recolector con alcohol al 70% (Figura 7). Se depositaron un litro de guano en cada uno de los embudos, tapándolos y dejándolos a temperatura ambiente durante dos días. Al tercer día, se encendió el foco localizado en la tapa para agilizar el movimiento de la fauna, con una duración de 24 horas continuas.

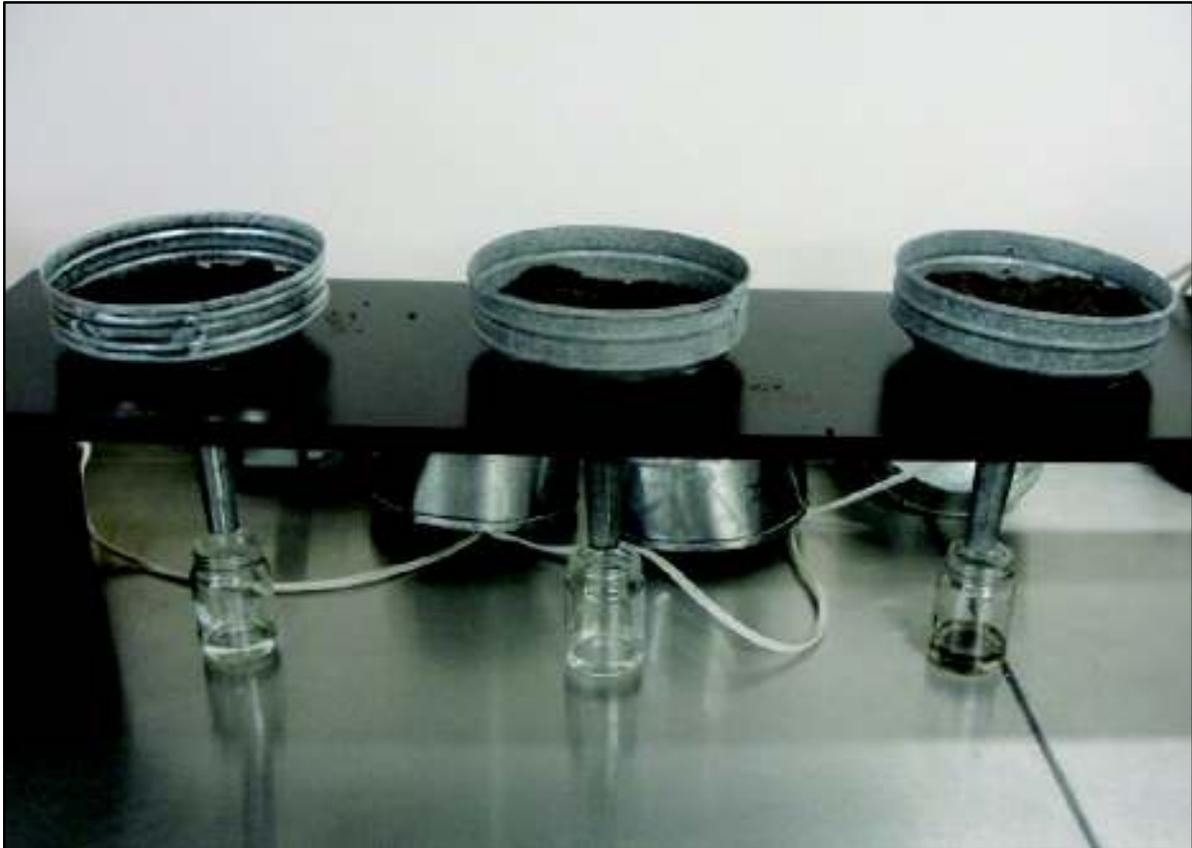


Figura 7. Embudos de lámina utilizados para la extracción de la fauna asociada al guano mediante el método de Berlese-Tullgren.

Después, se procedió a examinar y cuantificar a las especies que se recolectaron en los frascos, y para ello se emplearon un microscopio óptico y estereoscopio con base al tamaño de los ejemplares colectados. Su identificación fue en base a las referencias mencionadas con anterioridad. Para determinar su abundancia, se cuantificaron todos los ejemplares que cayeron en los recipientes colectores, separándolos por orden.

IV.4.1.2. Métodos directos

En cada sala de la Cueva de la Mariana y Cueva El Tigre se colectó en diferentes áreas de ambas cuevas, conforme se avanzaba en la exploración.

Las muestras biológicas colectadas mediante este método fueron realizadas de manera oportunista con diferentes instrumentos (aspirador, pinceles o con pinzas entomológicas). El aspirador permitió colectar rápidamente muchos ejemplares antes de que se escapen o se escondan en lugares inaccesibles; y este instrumento consistió en un frasco de plástico, de tamaño medio, con tapa de corcho, provista de dos mangueras con un diámetro de entre 4-5 cm y con una longitud de 50 a 60 cm, mientras que la de aspiración está provista de una malla que la cierra del extremo interno del frasco.

Se contabilizó las especies encontradas, y en el caso de especies gregarias, se colectó una muestra representativa y se colocó un cuadrante de 0.5 m x 0.5 m para determinar la abundancia de las especies presentes.

IV.4.1.3. Trampas con cebo

Se realizaron colectas mediante el uso de cebos como atrayentes. Los cebos utilizados que han tenido mejores resultados son los quesos aromáticos (Galán y Herrera, 1998). Para ello, se colocaron por triplicado botes de un litro con boca ancha, los cuales fueron enterrados por completo, y se taparon con rocas del sitio para simular un refugio para los invertebrados. A cada uno de ellos se le agregó un pedazo de queso comercial, con olor fuerte para atraer a los invertebrados de la cueva.

Las trampas fueron colocadas al azar en cada una de las salas, seleccionando diferentes áreas dentro de las salas con la finalidad de abarcar todos los sitios posibles, es decir, que las trampas nunca se colocaron en el mismo lugar durante todo el año de trabajo.

Para determinar la abundancia, se contabilizaba los ejemplares que caían en las trampas, si en la muestra existían una gran cantidad de invertebrados de la misma especie, solo se preservaban de 2 a 5 ejemplares y los demás se liberaban.

IV.4.2. Vertebrados

Para el caso de vertebrados no se realizará la preservación de las muestras biológicas, ya que la identificación fue “*in situ*”, empleando diferentes métodos y al igual que la metodología de los invertebrados, los muestreos se realizaron durante un año, que comenzó del 11 de abril de 2015 al 12 de abril de 2016, y se trabajó en las diferentes salas encontradas dentro de cada una de las cuevas. Los muestreos fueron tres veces por mes durante el periodo del estudio. Cada ejemplar se etiquetó con la siguiente información: fecha, localidad, número de registro, zona física en la que fue colectado, nombre de la sala, método empleado para su colecta y biotipo en el que se encontró (estalagmita, estalactitas, guano, roca, suelo, agua, etc.).

IV.4.2.1. Métodos directos

La captura de las diferentes especies de vertebrados (anfibios, reptiles, aves y mamíferos) se realizó de manera directa con las herramientas necesarias para cada grupo, con la finalidad de fotografiarlos para su identificación en campo. Su abundancia se calculó cuantificando las especies que aparecían en cada una de las técnicas de colecta empleadas.

Para anfibios y reptiles que se encuentren en las cavidades, se capturaron utilizando ganchos herpetológicos y/o guantes para el manejo de los especímenes que se presentaron y se colocarán en recipientes transparente para su registro e identificación mediante el uso de guías de campo.

En el caso de aves, la metodología empleada consistió en la fotografía de las especies que se presentaban cuando se exploraba la cueva.

Para el caso de los mamíferos, se utilizaron diferentes métodos directos para cada uno de las especies observados dentro de ambas cuevas.

- **Mamíferos medianos y grandes:** Se consideran mamíferos medianos y grandes según la definición de Ceballos y Navarro (1991). Mamíferos medianos son aquellos que presentan un peso entre 1 y menor a 10 kg, mientras que los mamíferos grandes son aquellos mayores a 10 kg, y por ello, se excluyeron especies del orden Chiroptera y la mayoría de Rodentia. Si durante la exploración de las cuevas se observa algunas especies

de esta categoría, se registraba mediante la cámara fotográfica, para su posterior identificación.

- **Rodentia:** Se colocaron al azar en cada una de las salas de ambas cuevas tres trampas Sherman con un cebo de crema de cacahuete con avena, la cual se colocaba en la parte final de la trampa para activar el mecanismo de dichas trampas. Las trampas se dejaron 24 horas abiertas. Para el manejo de los roedores, se utilizaban guantes y cinta métrica para medir sus principales caracteres morfológicos que se emplean para su identificación, así como su respectiva fotografía.
- **Chiroptera:** Las capturas fueron con una red de mano con el uso de luces rojas para reducir la alteración de la población presente. Se capturaron los murciélagos en su sitio de percha, con la finalidad de identificar si eran varias especies o solo una la que conformaba la población. La estimación de las poblaciones de las distintas especies de murciélagos se realizó mediante un cuadrante de 0.5 m x 0.5 m, en el cual se cuantificaban los individuos de las especies que se encontraban dentro de este cuadrante, realizando dos réplicas más. Se calculaba el área de percha mediante el distanciómetro LD 500 (STABILA), permitiendo obtener una estimación aproximada de la población de murciélagos.

IV.4.2.2. Métodos indirectos

Se emplearon métodos indirectos para buscar la presencia de huellas, heces, restos, u otro rastro que indicará la presencia de especies de vertebrados dentro de las cavidades, basadas en los métodos de colecta descrito por Aranda (2000), y de igual manera se registraron la zona en donde se presentaron, método empleado y biotipo que ocupaban.

IV.4.2.3. Cámaras-trampa

Conforme a la literatura acerca de la fauna cavernícola, la mayor actividad de vertebrados está limitada a la primera área de las cuevas, siendo las entradas utilizadas como refugios para las especies catalogadas como troglóxenas. Por ello, se colocó una cámara-trampa en cada una de las entradas de la Cueva de la Mariana y Cueva El Tigre.

Las cámaras-trampa utilizadas (SIMMONS®, modelo Whitetail) son sistemas de detección automática digitales que operan con un sensor infrarrojo pasivo. Las cámaras-trampa fueron programadas para permanecer activas las 24 horas, con un retraso mínimo de 1 minuto entre cada disparo y un registro de 3 fotografías por disparo. Se revisaron una vez cada tres meses.

Las especies fotografiadas fueron identificadas por comparación con base en literatura especializada, y la clasificación y nomenclatura utilizadas se basan en el trabajo de Ramírez *et al.* (2005) y para el caso de aves, la clasificación basada en la guía de campo de Sibley (2016).

Con el fin de estimar con mayor precisión la abundancia y para evitar contar varias veces al mismo individuo, sólo se consideraran como registros fotográficos independientes los siguientes casos utilizados por Monroy-Vilchis *et al.* (2011) y Lira-Torres & Briones-Salas (2012): 1) fotografías consecutivas de diferentes individuos, 2) fotografías consecutivas de individuos de la misma especie separadas por más de 24h, este criterio fue empleado cuando no era claro si una serie de fotografías corresponden al mismo individuo, de modo que las fotografías tomadas dentro del mismo periodo de 24h se consideraron como un solo registro y 3) fotografías no consecutivas de individuos de la misma especies. En el caso de las especies gregarias, las fotografías en donde se observó a más de un individuo, el número de registros independientes se consideró igual al número de individuos observados.

IV.5. Análisis estadísticos

IV.5.1. Curvas de acumulación de especies

Son herramientas que permiten el análisis de la riqueza de las especies con base al esfuerzo de muestreo. Las curvas de acumulación permiten 1) dar fiabilidad a los inventarios biológicos y posibilitar su comparación, 2) un mejor diseño experimental para el trabajo de muestreo, tras estimar el esfuerzo requerido para conseguir un inventario confiable y 3) extrapolar el número de especies observadas en un inventario para estimar el total de especies que posiblemente estarían (Moreno, 2001; Jiménez-Valverde y Hortal, 2003).

Previo a las curvas de acumulación, se realizó la estimación de la riqueza empleando métodos no paramétricos. El principio de dichos estimadores es que la probabilidad de captura

varía entre individuos de una población, así como la abundancia de las especies varia en un conjunto de especies. Los estimadores no paramétricos utilizados para este estudio fueron Chao 2, Jackknife 1, Jackknife 2 y Bootstrap, los cuales se obtuvieron con el programa PASTv3.

Otro de los estimadores utilizados para evaluar la calidad del muestreo fue el modelo de Clench, el cuál es el modelo más empleado y que ha demostrado un buen ajuste en la mayoría de las situaciones reales y para la mayoría de los taxones (Moreno, 2001; Jiménez-Valverde y Hortal, 2003). Para la construcción de esta curva se utilizó la ecuación de Clench. Esta ecuación está recomendada para estudios en sitios con áreas extensas o cuando se tiene mucho tiempo en el muestreo, es decir que existe una mayor probabilidad de añadir nuevas especies al inventario (Soberón y Llorente, 1993; Moreno, 2001; Jiménez-Valverde y Hortal, 2003). La ecuación de Clench está dada por la fórmula:

$$E(S) = \frac{ax}{1 + bx}$$

a = tasa de incremento de nuevas especies

b = parámetro relacionado con la forma de la curva

x = número acumulativo de muestras

A diferencia de los otros estimadores, este modelo permite un mejor ajuste para la predicción de la riqueza esperada, así como dar mayor peso a las especies raras o poco abundantes. Para considerar que la ecuación de Clench se ajusta adecuadamente, se calculó el coeficiente de determinación para ambas cuevas esperando que la curva se adapte al comportamiento de las variables, siendo entre más cercano a 1 lo más favorable.

IV.5.2. Índices de diversidad

IV.5.2.1. Índice de Simpson

Se utilizó para estimar la probabilidad de que dos individuos tomados al azar de una muestra sean de la misma especie. Este índice está relacionado fuertemente por la importancia de las

especies más dominantes. Como su valor es inverso a la equidad, la diversidad de una muestra se calculó como 1-D (Moreno, 2001; Magurran, 2004).

$$D = \sum P_i^2$$

Donde:

$$P_i = \frac{n_i}{N}$$

n_i : Es el número de individuos de la especie i .

N : Es el número de todos los individuos de todas las especies

IV.5.2.2. Índice de Diversidad de Shannon-Wiener

Con la información colectada, se procedió a calcular el índice de diversidad de Shannon-Wiener (Shannon y Wiener, 1949) para cada una de las cuevas. Este índice se basa en la teoría de la información y que en un contexto ecológico, mide el contenido de información por individuo en muestras obtenidas al azar de una comunidad de la que se conoce el número de especies. De esta forma, el índice contempla la cantidad de especies presentes en el área de estudio (riqueza de especies) y la cantidad relativa de individuos de cada una de esas especies (abundancia estimada). Los valores que proporciona van de 1 a 5; siendo los valores mayores a 3 son interpretados como diversos. El índice se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$H' = - \sum_{i=1}^s (P_i \times \ln P_i)$$

Dónde:

S : Es el número de especies (la riqueza de especies).

P_i : La proporción de individuos de la especie i con respecto al total de individuos (es decir, la abundancia relativa de la especie).

$$P_i = \frac{n_i}{N}$$

n_i : Es el número de individuos de la especie i .

N : Es el número de todos los individuos de todas las especies.

Para comparar el índice de diversidad obtenido entre las dos cuevas se utilizó una prueba t de Hutcheson (Moreno, 2001; Magurran, 2004). La diversidad ponderada (H_p), la varianza del índice de diversidad ponderada (var), la diferencia de las varianzas de ambas muestras (D_{var}), el valor de t , y los grados de libertad se calcularon con las siguientes fórmulas (Moreno, 2001):

Índice de diversidad ponderada:

$$H_p = \frac{[(N \log N) - (\sum f_i \log f_i)]}{N}$$

Varianza del índice de diversidad ponderada:

$$var = \frac{[\sum f_i \log^2 f_i - (\sum f_i \log f_i)^2] / N}{N^2}$$

Diferencia de varianzas:

$$D_{var} = \sqrt{var_1 + var_2}$$

Valor de t :

$$t = \frac{(H_{p1} - H_{p2})}{D_{var}}$$

Grados de libertad asociados al valor t :

$$g.l. = \frac{(\text{var}_1 + \text{var}_2)^2}{\left(\frac{\text{var}_1^2}{N_1}\right) + \left(\frac{\text{var}_2^2}{N_2}\right)}$$

Al obtener el valor de distribución t calculada, se comparó con los valores de t en tablas estadísticas. Si el valor de la t calculada es menor al valor de la t en la tabla, quiere decir que no existen diferencias significativas en la diversidad de los sitios muestreados fórmulas (Moreno, 2001).

IV.5.3. Índices de similitud de la diversidad faunística

Estos índices expresan un grado en el que dos muestras son semejantes por las especies presentes en ellas y permiten comprender el cambio de especies entre dos muestras. Como no existe un antecedente sobre el uso de estos índices de similitud para estudios en cuevas, se aplicaron varios índices con base a datos cualitativos y cuantitativos, para determinar la eficiencia del uso para especies de ambientes subterráneos.

El índice de Jaccard, se utiliza para obtener la similitud de datos cualitativos. Los valores obtenidos van de 0, cuando no hay especies compartidas entre ambos sitios, hasta 1 cuando los sitios tienen la misma composición de especies (Moreno, 2001). Se obtiene por la siguiente fórmula:

$$IJ = \frac{C}{A + B - C} \times 100$$

A = Número de especies en la comunidad A

B = Número de especies en la comunidad B

C = Número de especies comunes en ambas comunidades

El Coeficiente de similitud de Sørensen (Czekanovski-Dice-Sørensen), relaciona el número de especies en común con la media aritmética de las especies de ambos sitios (Moreno, 2001).

$$I_s = \frac{2C}{A + B}$$

A = Número de especies en la comunidad A

B = Número de especies en la comunidad B

C = Número de especies comunes en ambas comunidades

Índice de Sokal y Sneath se obtiene por la siguiente fórmula (Moreno, 2001):

$$I_{ss} = \frac{C}{2(C + B + A) - C}$$

A = Número de especies presentes solamente en la comunidad A

B = Número de especies presentes solamente en la comunidad B

C = Número de especies comunes en ambas comunidades

Índice de Braun-Blaquet fue (Moreno, 2001):

$$I_{B-B} = \frac{C}{C + B}$$

B = En este caso, B sigue siendo el número de especies exclusivamente de la comunidad B , siendo este sitio siempre el que tenga mayor número de especies.

C = Número de especies comunes en ambas comunidades

La ventaja de estos índices es su simplicidad, aunque presentan el inconveniente de no toma en cuenta la abundancia de las especies. Para este índice el peso de las especies es igual sin afectar si son abundantes o raras (Samo *et al.*, 2008). Por lo mismo, se aplicaron dos índices que emplean la abundancia calculada para cada uno de las cuevas (Moreno, 2001).

El primero fue el Coeficiente de similitud de Sørensen para datos cuantitativos,

$$I_{Scuant} = \frac{2pN}{AN + BN}$$

Donde:

AN = Número total de individuos de la comunidad A

BN = Número total de individuos de la comunidad B

pN = Sumatoria de la abundancia más baja de cada una de las especies compartidas entre ambos sitios

Por último se aplicó el Índice de Morisita-Horn, el cual está fuertemente influenciado por la riqueza de especies y el tamaño de las muestras, y tiene la desventaja de que es muy sensible a la abundancia de la especie más abundante (Moreno, 2001).

$$I_{M-H} = \frac{2 \sum (AN_i \times BN_j)}{(dA + dB) (AN \times BN)}$$

AN_i = Número de individuos de la i -ésima especie en la comunidad A

BN_j = Número de individuos de la j -ésima especie en la comunidad B

$$dA = \sum AN_i / AN^2$$

$$dB = \sum BN_i / BN^2$$

IV.5.4. Valores de regresión

Con la finalidad de interpretar la relación de las diferentes variables ambientales y biológicas investigadas, se realizó un análisis de correlación utilizando el coeficiente de correlación mediante la opción de análisis de datos en el programa Excel versión 2013.

Las variables empleadas corresponden a los valores ambientales de temperatura y humedad relativa, exclusivamente de las zonas más profundas, ya que son las que registraron un ambiente climático de cueva.

Para el caso de los factores biológicos se analizó a la población de *Tadarida brasiliensis*, interpretándose como en función de la cantidad de guano depositado dentro de las cuevas y se relacionó con las variables ambientales mencionadas para ambas cuevas y además con las abundancias encontradas para el grupo de invertebrados que se consideran habitantes del guano, para determinar la dependencia de ellos, así como un grupo externo de las poblaciones encontradas dentro como control.

V. RESULTADOS

V.1. Descripción y cartografía de las cuevas

La Cueva de la Mariana y la Cueva El Tigre se encuentran en un afloramiento de rocas expuestas en la superficie correspondiente al periodo Proterozoico tardío y Cámbrico temprano (más de 500 mil años de edad). Las rocas donde se encuentran las cuevas están compuestas principalmente por dolomías, la cual es una roca sedimentaria de origen químico (precipitación directa en suelos marinos), compuesta básicamente del mineral dolomita, cuya composición química es carbonato de calcio y magnesio ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). Las cuevas se encuentran ubicadas dentro de un área que ha sido afectada por una serie de fallas y fracturamientos, que permitieron la filtración de agua y la disolución de la dolomita para obtener como resultado dos formaciones kársticas (Armienta *et al.*, 2011; Servicio Geológico Mexicano 2012).

De acuerdo a la clasificación espeleométrica mencionada por Montero-García (2000), se indica que ambas cavidades son CUEVAS, ya que ambas son cavidades formadas por varias salas y galerías hasta un largo total que no excede el kilómetro.

V.1.1. Cueva de la Mariana

La Cueva de la Mariana se encuentra a 2.5 km al noreste de la Cueva El Tigre. Se bautizó con el nombre de la Mariana debido a que el nombre del cerro donde se ubica dicha cueva se llama Cerro de la Mariana. Esta cueva presenta una extensión de 497 m y un desarrollo vertical de 44 m. Con la información de la topografía se obtuvieron dos mapas, el mapa de planta que se visualiza a la cueva como si se observara desde arriba (Figura 8) y el mapa de alzado, que consiste en representar el desarrollo de la cueva, observándose principalmente la profundidad de la misma (Figura 9).

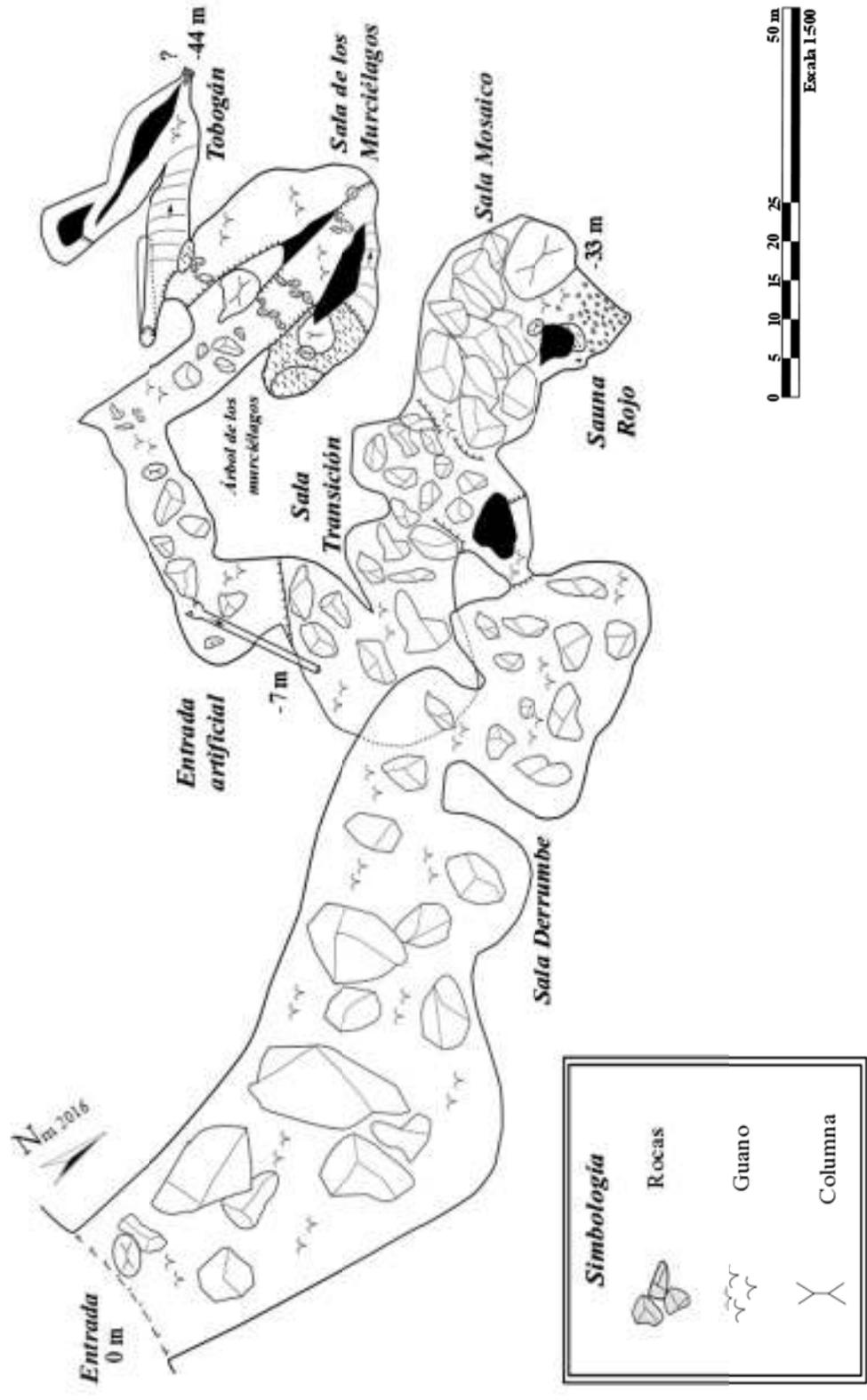


Figura 8. Mapa de planta de la Cueva de la Mariana con una extensión de 497 metros y un desarrollo vertical de 44 metros, conformado por la Sala Derrumbe, Sala Transición, Sala Mosaico y Sala de los Murciélagos.

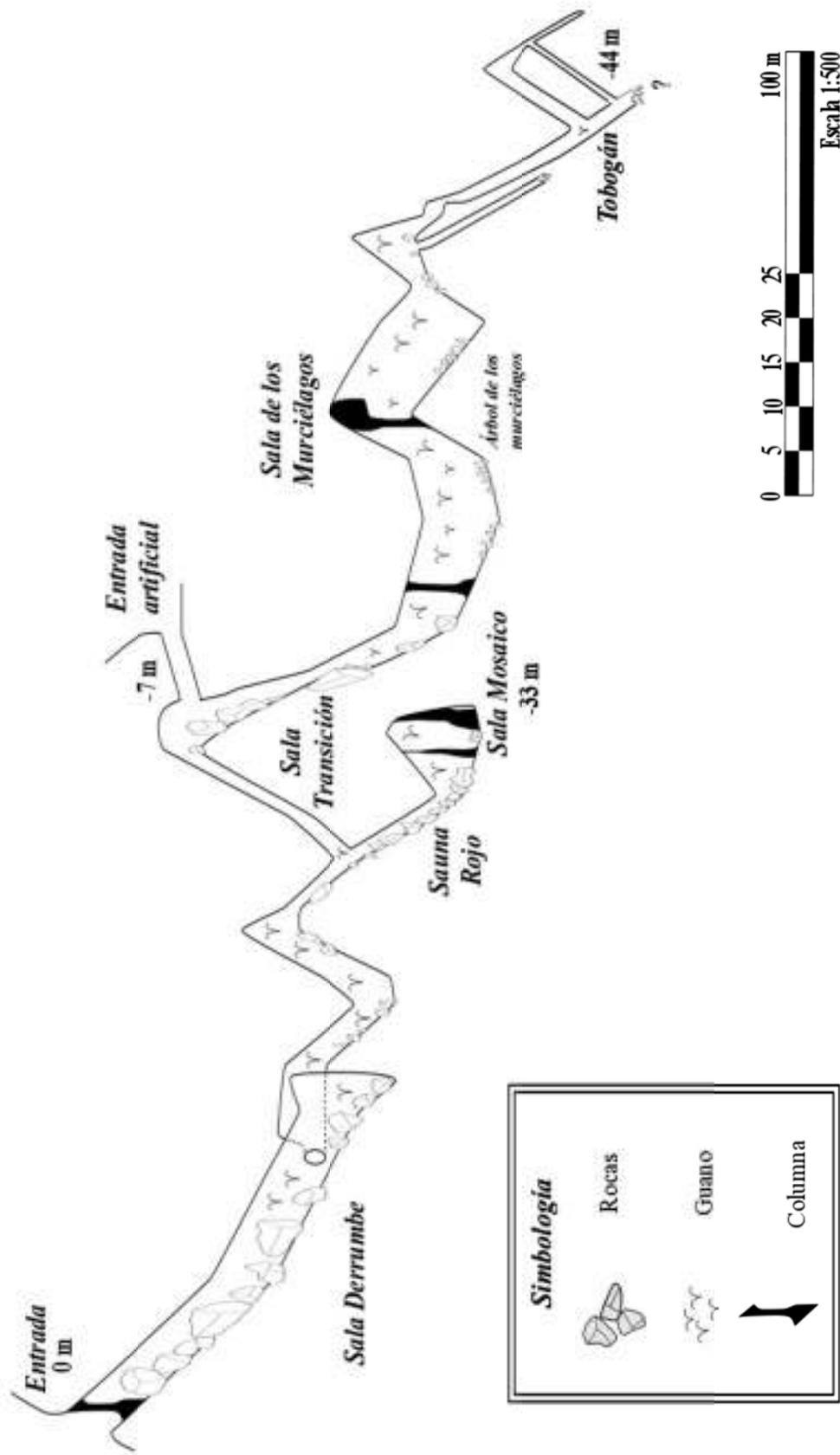


Figura 9. Mapa alzado de la Cueva de la Mariana con una extensión de 497 metros y un desarrollo vertical de 44 metros, se puede observar el desarrollo vertical y las profundidades máximas de la Sala Mosaico y el Tobogán.

La cueva cuenta con dos entradas, la primera con coordenadas en 29° 35' 25.9" N y 110° 48' 8.9" O, que corresponde a la entrada natural a una altura de 507 msnm, y una segunda entrada, creada de manera artificial y localizada a 29° 35' 27.4" N y 110° 48' 11.1" O a una altura de 501 msnm.

Iniciando el recorrido de la cueva por la entrada natural, se observa una amplia boca con una altura de 18 m de ancho por 6 m de altura, y se llega a la sala de mayor tamaño de la cueva, denominada Sala Derrumbe. Su nombre se debe a que en esta sala se encuentran rocas de diversos tamaños que fueron producto de la caída de secciones del techo, ubicados por toda la extensión de la sala.

La característica principal de esta sala corresponde a una columna que se encuentra a pocos metros de la entrada, y que albergo durante todo el año de muestreo una población de avispas del género *Polistes*, siendo de las pocas columnas de la cueva.

A la mitad de la Sala Derrumbe, se encuentra la entrada hacia área de penumbra de la cueva, accediendo por un túnel de una altura de 3 m, y llegando a esta sección existen dos caminos, que llevan a distintas salas. Accediendo por el área de la penumbra, se sube y hacia la derecha se encuentra un camino que lleva a la Sala Mosaico, que su descripción se asemeja a la Sala Derrumbe pero su nombre proviene del acomodo de las rocas de gran tamaño que se encuentran colocadas de manera continua con pequeñas brechas de separación, posiblemente ocasionado por el derrumbe homogéneo del techo de esta sección de la cueva. La Sala Mosaico es una sección de 36 m de largo, en su última parte de dicha sala se encuentra una acumulación de agua mezclada con guano.

En una sección intermedia de la Sala Mosaico, se encuentra un pequeño espacio al cual se le llamo Sauna Rojo, debido a su coloración y por su alta humedad relativa y temperatura a comparación con el resto de las salas. Es esta sección de la Sala Mosaico la roca presenta un tono rojizo parecido al ladrillo, debido a procesos de oxidación y la presencia de componentes ferrosos en su estructura.

Regresando a la parte de penumbra, tomando el otro camino se llega a la Sala Transición, nombre otorgado por ser la conexión entre la entrada natural y la artificial. Su extensión es de

76 m y en esta sección es donde se encuentra el camino para acceder a la parte más profunda de la cueva.

La entrada artificial es un túnel de aproximadamente dos metros de altura y un desarrollo de 22 m, que desemboca en la Sala Transición, que para acceder se encuentra un tronco que funciona como escalera para poder llegar a dicha sala.

En todas las salas que se han descrito con anterioridad se presenta guano en diferentes concentraciones, observándose mayores acumulaciones conforme se adentra uno a la cueva, sin embargo el guano presente en estas salas tiene una consistencia seca.

Exactamente por debajo del túnel de la entrada artificial, se encuentra el camino hacia la Sala de los Murciélagos, adentrándose por una sección con una inclinación superior a los 35°, en el cual se llega a un pequeño precipicio que se baja escalando por la pared de las rocas.

A partir de ahí, esta sección es de gran tamaño tanto de extensión como de altura, y como se mencionó anteriormente, esta sala se conoce como Sala de los Murciélagos debido a que existen poblaciones de quirópteros durante todo el año. Su dimensión supera los 100 m de extensión y su altura máxima fue de 15 m. El suelo se encuentra cubierto por guano fresco, y tiene dos estructuras características; en la parte central de la sala se encuentra una columna que divide en dos partes la sala, y una estructura denominada Árbol de Murciélagos, en el cual su forma se asemeja a un árbol y en él se refugian una población de murciélagos entre cada una de sus ramificaciones.

Siguiendo la descripción, en una de las divisiones de la Sala de los Murciélagos se encuentra un paso estrecho que lleva a la última parte de la cueva hasta ahora descrita, esta sección se denominó tobogán, la cual consiste en un corredor con una extensión de 26 m y una inclinación superior a los 55°, llegando a la parte más profunda a partir de la entrada con una profundidad de 44 m. En la parte final, existe una desviación con dos rutas, en donde ambas se conectan más adelante a un área en donde finalizaba la cueva.

Durante los meses de noviembre y diciembre del 2015, cuando se realizaban los muestreos correspondientes, se encontraron dos nuevas secciones a las que se nombraron Sala Mini Columnas y Sala Balcón, que no se han agregado al mapa final debido al diseño del experimento pero como son nuevas secciones y se encuentran conectadas con la Sala de los

Murciélagos, se incluyeron como parte de esta sala. Las mediciones de estas nuevas salas ya se realizaron y se obtuvieron 200 m extras de extensión para la Cueva de la Mariana, siendo un total de 697 m de extensión y su profundidad sigue siendo 44 m.

V.1.2. Cueva El Tigre

La Cueva El Tigre cuenta con una extensión de 156 metros y un desarrollo vertical de 46 metros (Figura 10 y Figura 11), posee una entrada de 5 m de altura por 12 m de ancho, muy similar a la entrada natural de la Cueva de la Mariana.

Debido a las dimensiones de la entrada y su ubicación con respecto al movimiento del sol, la luz penetra la mayor parte del día sobre la entrada, en esta sección presenta un suelo rocoso cubierto por excreta seca de murciélago y rocas de gran tamaño alrededor de la cueva.

Esta área con luz presenta una bifurcación en donde una sección, la del lado derecho lleva a una pared inclinada superior a los 55°, en donde hay presencia de guano fresco y que su acceso se hace escalando.

El otro camino, el del lado izquierdo, lleva a lo más remoto de la cueva, en donde hay un corredor de 35 m de largo, en el cual la luz disminuye y empieza la sección de penumbra.

En esta sección se observan rocas colocadas en ambas orillas de la cueva, así como pequeñas formaciones de espeleotemas (estalactitas) y un suelo rocoso sin materia orgánica distinta al guano, aunque su acumulación es poca. Conforme se atraviesa esta sección, se llega a la primera sala denominada Sala Amonio, la cual presenta rocas esparcidas por todo el suelo y cubiertas de guano, por lo general fresco. Además, existe un umbral al atravesar esta sala, ya que la sensación de humedad del ambiente incrementa considerablemente en cuanto entras a dicha sección de la sala. La actividad de los murciélagos es variable, ya que es una sección en donde la oscuridad no es plena.

Continuando por el único camino que existe, se llega a la Sala Tadarida, nombre recibido por presentar a la especie de murciélago guanero de cola libre *Tadarida brasiliensis*, constatemente.

La Sala Tadarida, que corresponde a un área de completa oscuridad, con un suelo rocoso, con rocas de mediano y pequeño tamaño dispersas por toda el área, la humedad y temperatura es mayor que la sección anterior y el suelo está conformado por guano fresco los primeros diez centímetros, después de esto se encuentra el suelo y rocas.

La sección más profunda de la cueva, la abarca una sala de 18 m de largo por 6 m de ancho y 3 m de altura. La composición de esta área es semejante a la anterior, suelo rocoso con guano fresco, rocas en las orillas y dispersas por toda la sala. Esta última sección fue refugio del zorrillo manchado *Spilogale gracilis*, por lo que fue nombrada Sala Spilogale.

V.2. Clima de la Cueva de la Mariana y Cueva El Tigre

V.2.1. Clima interno de la Cueva de la Mariana

Se midió la temperatura y la humedad relativa de dicha cueva mediante el uso de dos sensores colocados en la Sala Transición y en la parte central de la Sala de los Murciélagos, ya que la entrada es de las principales secciones con oscilaciones climáticas drásticas, por lo que se descartó el uso de sensores en esta zona.

Con base a los resultados obtenidos de los sensores, para la sección de transición (Sala Transición), la temperatura media anual fue de 22.62 °C y 53% de humedad relativa, mientras que en la Sala de los Murciélagos fue de 26.54 °C y 52% de humedad relativa. En el Tabla 1 se presentan las medias mensuales de la temperatura para ambas salas. Se puede observar que no se presenta una oscilación climática dentro de la cueva, ya que en la Sala Transición su rango de temperatura fue 4.05°C y en la zona profunda, donde existe varias poblaciones de murciélagos su diferencia entre la temperatura máxima y mínima fue de 1.76. Además en ambas salas, los valores más altos se presentaron durante el mes de noviembre de 2015.

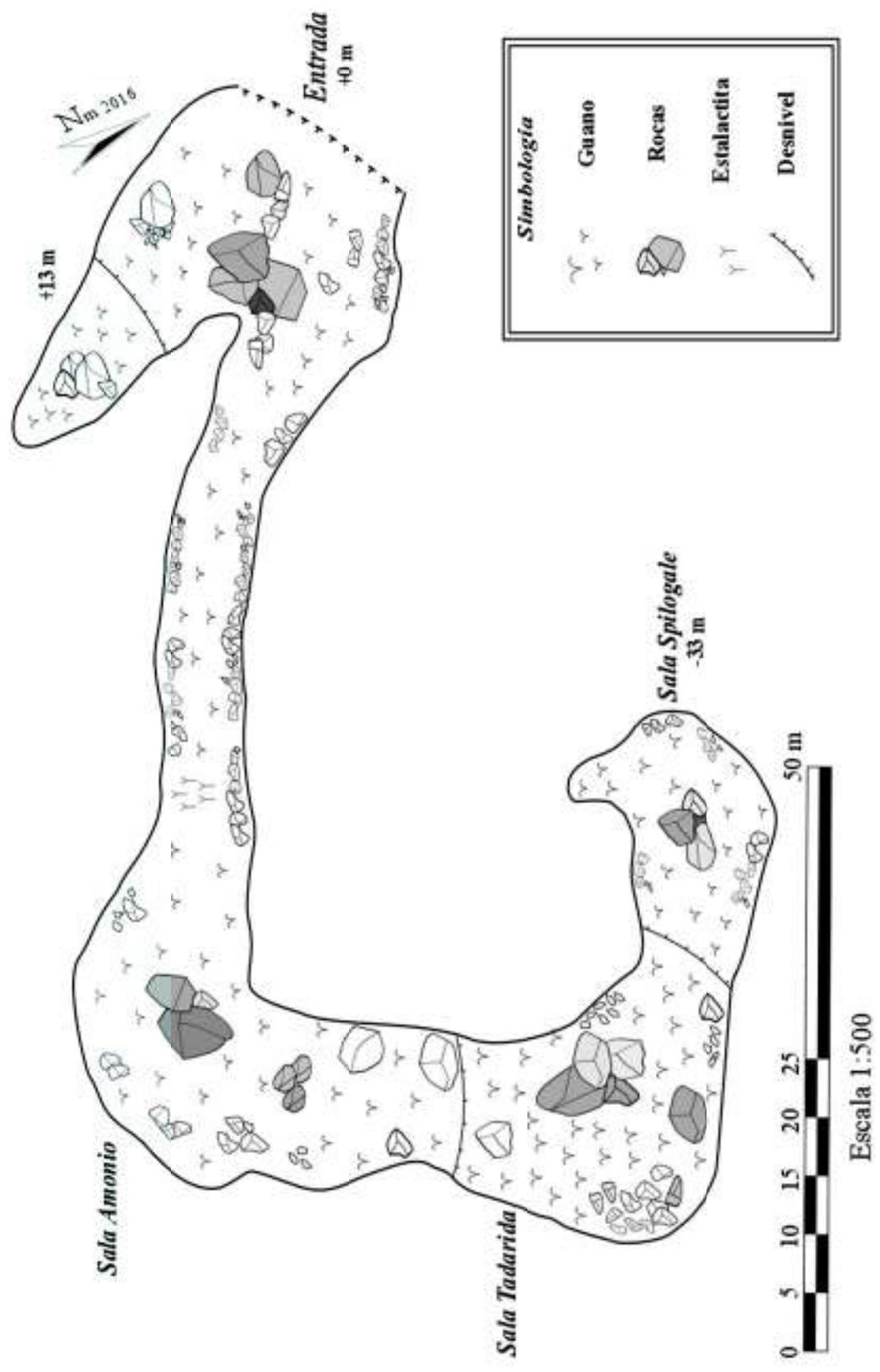


Figura 10. Mapa de planta de la Cueva El Tigre con una extensión de 156 metros y un desarrollo vertical de 46 metros, siendo su área más profunda la Sala Spilogale con -33 metros.

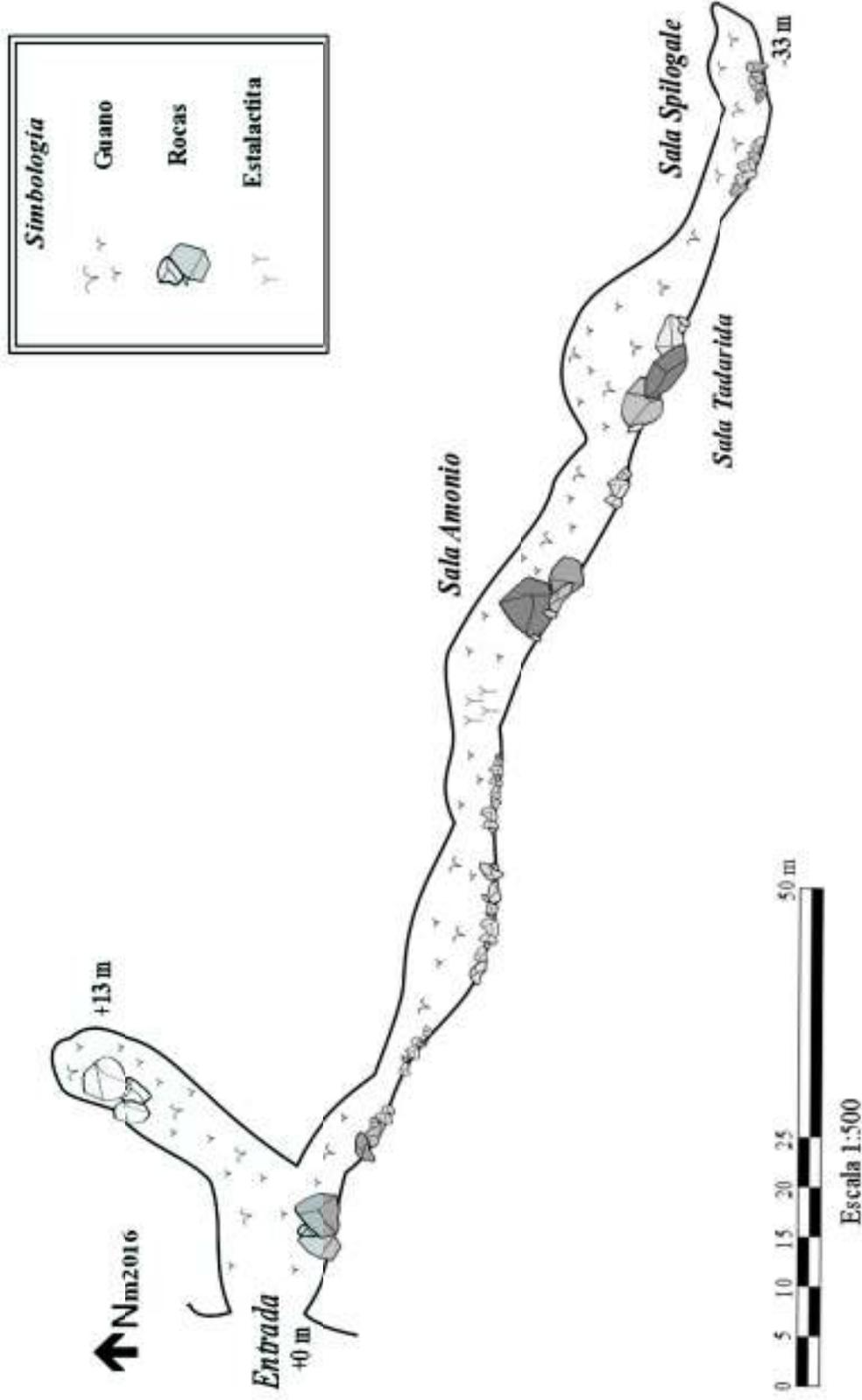


Figura 11. Mapa alzado de la Cueva El Tigre, ubicada en la localidad de Horcasitas, conocida por su población del murciélago guanero *Tadarida brasiliensis*, llegando en cierta época del año al millón de individuos, localizándose en toda la cueva.

Tabla 1. Temperatura media (Temp. °C), máxima (Temp. máx.) y mínima (Temp. mín.) mensuales para la Sala Transición y Sala de los Murciélagos de la Cueva de la Mariana.

	Sala Transición			Sala de los Murciélagos		
	Temp. (°C)	Temp. máx.	Temp. mín.	Temp. (°C)	Temp. máx.	Temp. mín.
Abril 2015	23.16	24.97	22.21	26.99	27.91	26.42
Mayo 2015	23.18	24.87	22.34	26.56	27.3	26.07
Junio 2015	23.47	25.14	22.81	26.53	27.14	26.25
Julio 2015	24.45	25.54	23.69	26.82	27.65	26.63
Agosto 2015	24.62	25.69	23.92	27.15	27.65	26.85
Septiembre 2015	25.17	26.67	24.33	27.61	28.3	27.19
Octubre 2015	24.49	25.82	23.75	27.16	27.78	26.74
Noviembre 2015	23.10	24.87	22.00	26.42	26.95	26.11
Diciembre 2015	22.27	24.20	20.03	26.04	26.54	25.49
Enero 2016	19.89	23.16	19.37	25.85	26.57	25.62
Febrero 2016	19.47	19.47	19.47	25.93	26.28	25.73
Marzo 2016	19.47	19.47	19.47	25.83	26.39	25.64
Abril 2016	19.47	19.47	19.47	25.92	26.52	25.79

Las humedades relativas detectadas por los sensores presentaron valores máximos y mínimos muy elevados, teniendo un rango para la Sala Transición de 52% y para la Sala de los Murciélagos fue de 45%. A diferencia de la temperatura, el mes de septiembre obtuvo el valor mensual más alto, sin embargo solo se presentó en la Sala Transición, mientras que para la Sala de los Murciélagos, el valor mensual más alto fue un mes después. Sin embargo, el valor máximo de humedad registrado durante todo el año fue de 79%, que se presentó durante el mes de septiembre. Véase Tabla 2.

V.2.2. Clima interno de la Cueva El Tigre

En el caso de la Cueva El Tigre, su temperatura media anual fue de 28.96 °C y 62% de humedad relativa para la sección media de la cueva, ubicándose en la Sala Amonio. Así mismo, para la sección más profunda (Sala Spilogale), la temperatura media anual fue de 29.27 °C y con una humedad de 67%.

La Cueva El Tigre, a pesar de ser menor que la Cueva de la Mariana fue la cueva que registro valores superiores a los 30 °C y una humedad casi del 90 % durante los meses de agosto

y septiembre de 2015. Se presentan los valores mensuales de temperatura y humedad en la Tabla 3 y 4, respectivamente.

Tabla 2. Humedad relativa media (HR %), máxima (HR máx.) y mínima (HR mín.) mensuales para la Sala Transición y Sala de los Murciélagos de la Cueva de la Mariana.

	Sala Transición			Sala de los Murciélagos		
	HR (%)	HR máx.	HR mín.	HR (%)	HR máx.	HR mín.
Abril 2015	42.58	47.00	38.00	40.56	47.00	36.00
Mayo 2015	40.59	45.00	39.00	38.22	41.00	35.00
Junio 2015	46.80	62.00	38.00	42.73	47.00	39.00
Julio 2015	70.83	79.00	56.00	50.33	63.00	46.00
Agosto 2015	81.98	89.00	79.00	59.25	66.00	54.00
Septiembre 2015	87.45	89.00	82.00	71.83	79.00	59.00
Octubre 2015	75.35	89.00	65.00	73.54	78.00	69.00
Noviembre 2015	47.94	68.00	40.00	55.70	70.00	45.00
Diciembre 2015	40.19	44.00	37.00	43.56	47.00	36.00
Enero 2016	38.72	44.00	38.00	38.40	53.38	34.00
Febrero 2016	38.00	38.00	38.00	53.84	64.91	52.81
Marzo 2016	38.00	38.00	38.00	56.54	68.94	54.15
Abril 2016	38.00	38.00	19.00	59.83	66.78	56.86

Tabla 3. Temperatura media (Temp. °C), máxima (Temp. máx.) y mínima (Temp. mín.) mensuales para la Sala Amonio y Sala Spilogale de la Cueva El Tigre.

	Sala Amonio			Sala Spilogale		
	Temp. (°C)	Temp. máx.	Temp. mín.	Temp. (°C)	Temp. máx.	Temp. mín.
Abril 2015	28.79	29.59	28.29	28.52	29.05	27.34
Mayo 2015	28.80	29.60	28.38	28.49	29.23	28.32
Junio 2015	28.57	28.99	28.37	28.51	28.99	28.32
Julio 2015	29.31	30.28	28.83	29.68	32.55	28.83
Agosto 2015	30.56	31.27	29.79	31.23	31.23	31.23
Septiembre 2015	30.67	30.67	30.67	31.23	31.23	31.23
Octubre 2015	30.67	30.67	30.67	31.23	31.23	31.23
Noviembre 2015	28.67	30.67	27.75	29.28	31.23	28.38
Diciembre 2015	27.75	27.75	27.75	28.38	28.38	28.38
Enero 2016	27.70	28.12	27.75	28.37	28.38	28.08
Febrero 2016	27.94	28.44	27.64	28.14	28.54	27.93
Marzo 2016	28.22	28.54	28.00	28.26	28.65	28.13
Abril 2016	28.25	28.52	27.92	28.35	28.49	28.20

Tabla 4. Humedad relativa media (H %), máxima (HR máx.) y mínima (HR mín.) mensuales para la Sala Amonio y Sala Spilogale de la Cueva El Tigre.

	Sala Amonio			Sala Spilogale		
	HR (%)	HR máx.	HR mín.	HR (%)	HR máx.	HR mín.
Abril 2015	42.05	71.00	38.00	49.40	75.00	44.00
Mayo 2015	40.29	44.00	39.00	42.16	45.00	36.00
Junio 2015	40.79	44.00	37.00	39.55	44.00	37.00
Julio 2015	54.85	75.00	38.00	58.49	90.00	38.00
Agosto 2015	84.70	88.00	75.00	90.00	90.00	90.00
Septiembre 2015	87.00	87.00	87.00	90.00	90.00	90.00
Octubre 2015	87.00	87.00	87.00	90.00	90.00	90.00
Noviembre 2015	67.27	87.00	58.13	74.03	90.00	66.64
Diciembre 2015	58.13	58.13	58.13	66.64	66.64	66.64
Enero 2016	58.13	58.92	57.22	66.59	66.64	62.38
Febrero 2016	57.61	64.99	52.69	63.08	75.66	56.55
Marzo 2016	62.50	66.63	58.62	72.23	77.4	67.71
Abril 2016	65.57	69.13	60.26	74.28	76.37	68.11

La Sala Amonio presentó un rango de temperatura anual de 3.63 °C y para el caso de la humedad fue superior al 50%, mientras que en el área profunda, que corresponde a la Sala Spilogale, los valores del rango de temperaturas y de humedad anuales fueron de 5.46 °C y 54%, respectivamente.

V.2.3. Comparación del clima de ambas cuevas

Las diferencias de temperatura y humedad relativa para ambas cuevas, alcanzaron entre 1.5 a 6 °C y valores de humedad superiores al 50%. En la Figura 12 y 13 se aprecian el clima interno de ambas cuevas en el sensor localizado en el área más profunda.

Se puede observar que el comportamiento de ambas cuevas es similar, teniendo un incremento de humedad durante los meses de agosto, septiembre y octubre. La Cueva de la Mariana, después de presentar los puntos máximos para estos meses, su humedad se reduce casi en un 50%, mientras que en la Cueva El Tigre su disminución no es tan drástica. Además la temperatura de la Cueva El Tigre obtuvo registros mayores que la Cueva de la Mariana, registrando valores continuos superiores a los 28 °C.

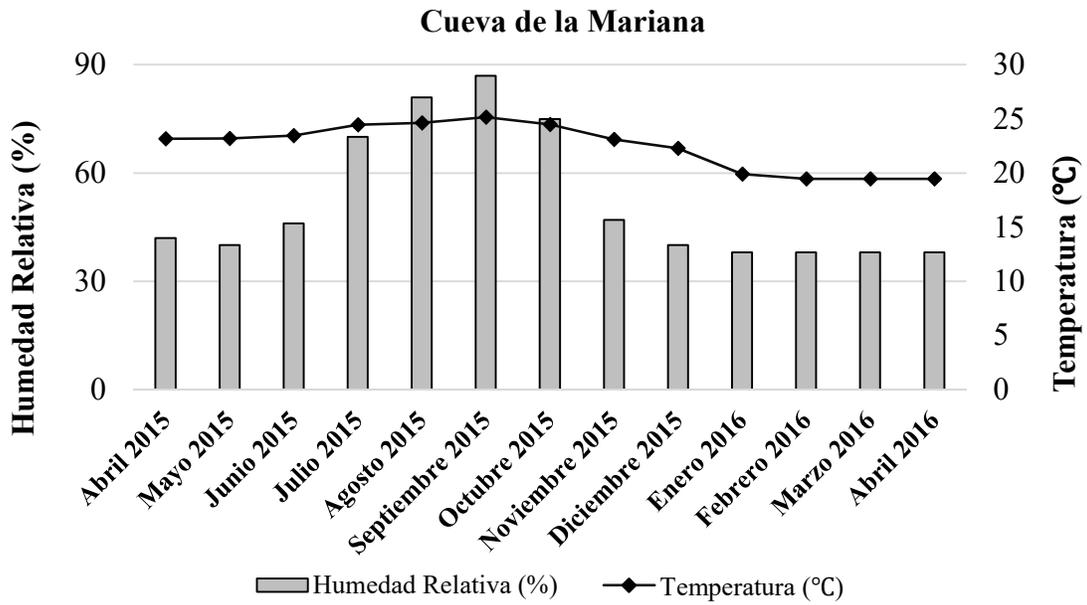


Figura 12. Clima interno de la Cueva de la Mariana de su zona más profunda (Sala de los Murciélagos).

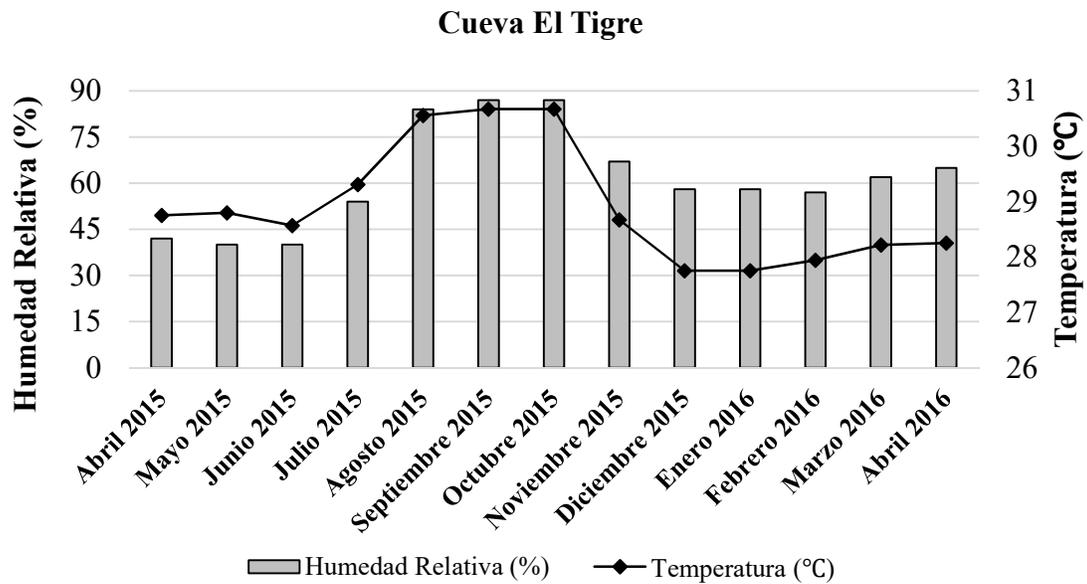


Figura 13. Clima interno de la Cueva El Tigre de su zona más profunda (Sala Spilogale).

V.3. Zonación de la Cueva de la Mariana y Cueva El Tigre

Para la delimitación de las zonas físicas presentes en ambas cuevas, se emplearon los valores obtenidos de temperatura y humedad, así como la topografía y las dimensiones de las cuevas.

En la Cueva de la Mariana presentó tres zonas físicas pertenecientes al ambiente superficial e intermedio, descartando la presencia del ambiente subterráneo propiamente dicho.

Para las zonas físicas de la Cueva El Tigre fueron, al igual que la Cueva de la Mariana, tres de las cuatro posibles zonas las que se presentaron, abarcando el ambiente superficial y el intermedio (Tabla 5).

Tabla 5. Zonación física de ambas cuevas con sus respectivas salas.

	Zona de entrada	Zona transicional	Zona ventilada	Zona profunda
Cueva de la Mariana	Entrada	Sala Transición	Sala de los Murciélagos	
	Sala Derrumbe Entrada artificial	Sala Mosaico	Sala Mini Columnas Sala Balcón Tobogán	
Cueva El Tigre	Entrada	Penumbra	Sala Amonio Sala Tadarida Sala Spilogale	

V.4. Guano

Los recursos energéticos dentro de una cueva provienen principalmente de la superficie que los rodea, por lo general el flujo del agua y el movimiento activo de la fauna son los encargados de aportar dichos recursos. El primer caso es típico de cuevas donde existan cuerpos de agua dentro de los ambientes subterráneos, mientras que el segundo, está asociado a cuevas terrestres, sin la presencia de cuerpos de agua.

Con base a las observaciones realizadas durante los muestreos sugieren que el recurso energético predominante en ambas cuevas fue el guano, el cual es producido por las diferentes poblaciones de murciélagos que utilizaron las cuevas durante todo el año. Su presencia dentro de las cuevas varió dependiendo de la especie, encontrándose algunas especies ciertos meses y con una variación en el tamaño de la población.

En la Cueva de la Mariana se registraron siete especies de quirópteros. A continuación se presentan las especies que se encontraron y el número de individuos encontrados por especie. Las especies fueron *Macrotus californicus* ($n=1,985$), *Leptonycteris yerbabuena* ($n=19,613$), *Mormoops megalophylla* ($n=6,788$), *Pteronotus davyi* ($n=7,175$), *Myotis velifer* ($n=6,143$), *Natalus mexicanus* ($n=849$) y *Tadarida brasiliensis* ($n=2,032,259$). De esas especies, solo dos estuvieron presentes durante todo el año de estudio. La población de *T. brasiliensis* es la principal productora de guano para dicha cueva (Figura 14). Su distribución dentro de la cueva es en la parte central de la Sala de los Murciélagos y en el Árbol de los Murciélagos, en donde se encuentra la mayor acumulación de guano, que ocupa toda el área de la cueva con 15 cm de profundidad.

En la Cueva El Tigre solo se encontraron cuatro especies de murciélagos durante el año de estudio. De la misma manera que en la Cueva de la Mariana, se presentan las especies que se encontraron y el número de individuos encontrados por especie. Las especies fueron con *M. californicus* ($n=1,825$), *P. davyi* ($n=575$), *N. mexicanus* ($n=775$) y *T. brasiliensis* ($n=6,041,898$). La producción de guano proviene de especies insectívoras, y *T. brasiliensis* es la responsable de proveer la mayor cantidad de guano, reflejándose en su tamaño poblacional y ubicándose en la toda la cueva (Figura 15).

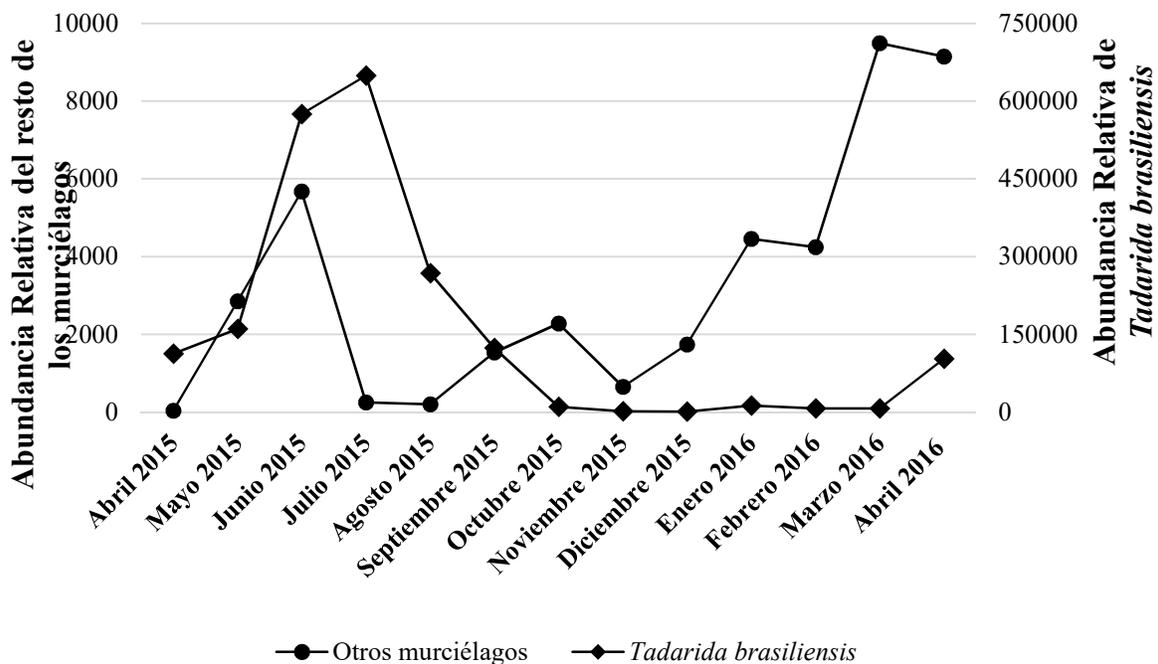


Figura 14. Tamaño de la población de *Tadarida brasiliensis* y la suma de las poblaciones de los demás quirópteros presentes dentro de la Cueva de la Mariana.

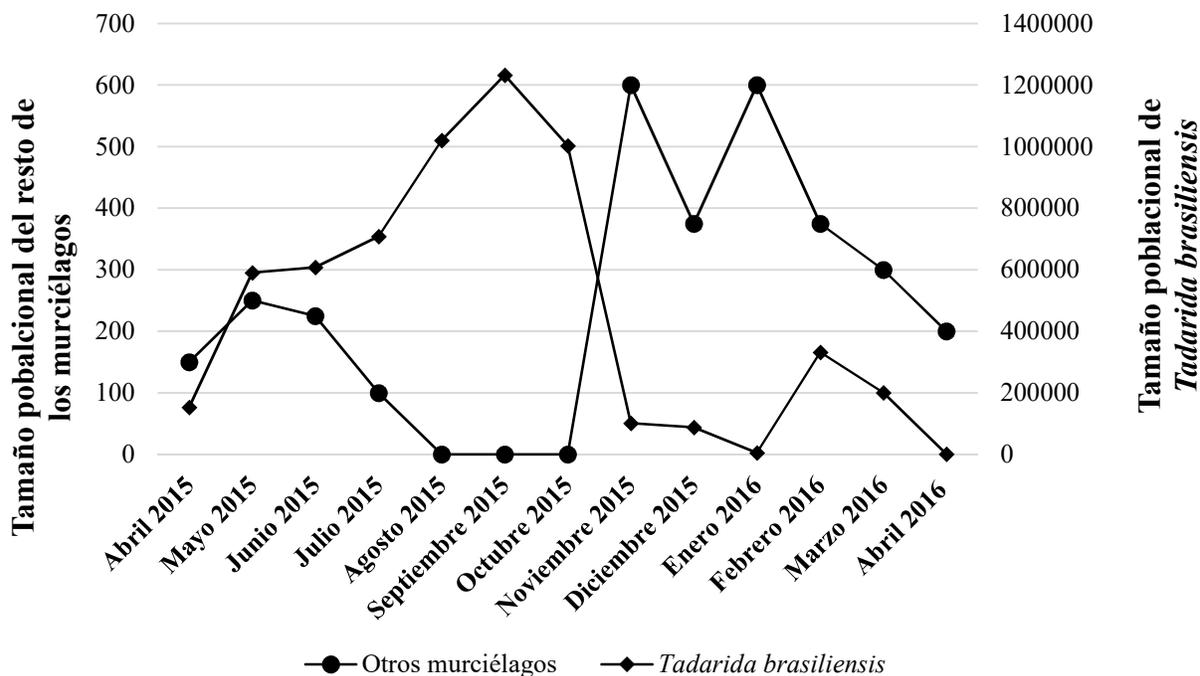


Figura 15. Tamaño de la población de *Tadarida brasiliensis* y la suma de las poblaciones de los demás quirópteros presentes en la Cueva El Tigre.

A diferencia de la Cueva de la Mariana, a pesar de ser de menor tamaño la Cueva El Tigre, abarca al mayor número de murciélagos y por ende, la mayor producción de guano (Figura 16).

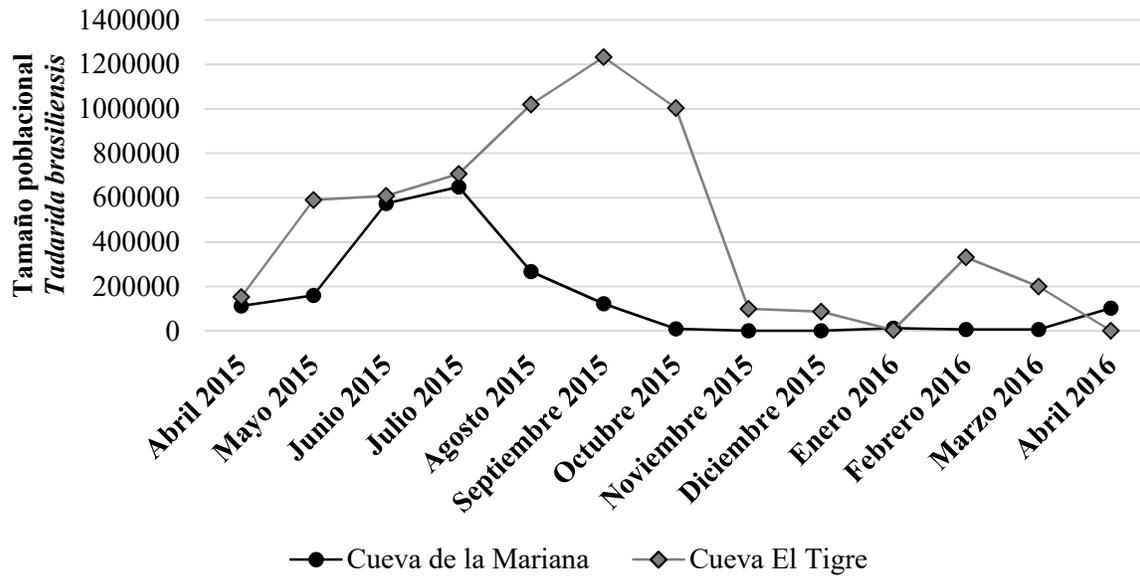


Figura 16. Tamaño poblacional aproximado de la especie de murciélago *Tadarida brasiliensis* en la Cueva de la Mariana y Cueva El Tigre.

V.5. Diversidad biológica

V.5.1. Riqueza de especies faunísticas de la Cueva de la Mariana y Cueva El Tigre

Dentro de ambas cuevas se encontró un total de 52 especies pertenecientes a 51 géneros, 38 familias y 23 órdenes. En la Cueva de la Mariana se registraron 43 especies de vertebrados e invertebrados, mientras que en la Cueva El Tigre se encontraron 28 especies. Del total mencionado anteriormente, 19 especies compartieron ambas cuevas. Véase listado de especies en Apéndice 1.

Los invertebrados estuvieron representado por el grupo de los artrópodos exclusivamente. Dichas especies han demostrado una amplia capacidad de colonizar una variedad de ambientes, siendo las cuevas uno más de ellos. Se encontraron 18 especies para la Cueva de la Mariana, en donde 12 especies fueron exclusivas para dicha cueva. Los ciempiés fueron la clase que solo se

encontró en la Cueva de la Mariana. Para el caso de la Cueva El Tigre, solo se encontraron dos clases de artrópodos, con un total de 12 especies, siendo seis exclusivas para dicha cueva. Seis especies pertenecientes a los órdenes Pseudoescorpiones (1), Amblypygi (1), Araneae (1), Psocoptera (1) y Hymenoptera (1), Coleoptera (1) se colectaron para ambas cuevas (Figura 17).

Para los grupos de los vertebrados, se registró mínimo una especie de vertebrados a excepción del grupo de los peces. La Cueva de la Mariana registró un total de 25 especies de vertebrados, siendo el 80% representado por el grupo de los mamíferos, mientras que la Cueva El Tigre fueron 16 especies. Los órdenes abundantes para ambas cuevas fueron Rodentia, Chiroptera y Carnivora. El orden Anura solo se encontró en una ocasión en la Cueva de la Mariana, y para la Cueva El Tigre, los Strigiformes fueron exclusivos para ella. Para ambas cuevas, 13 especies fueron las que se registraron como compartidas (Figura 18).

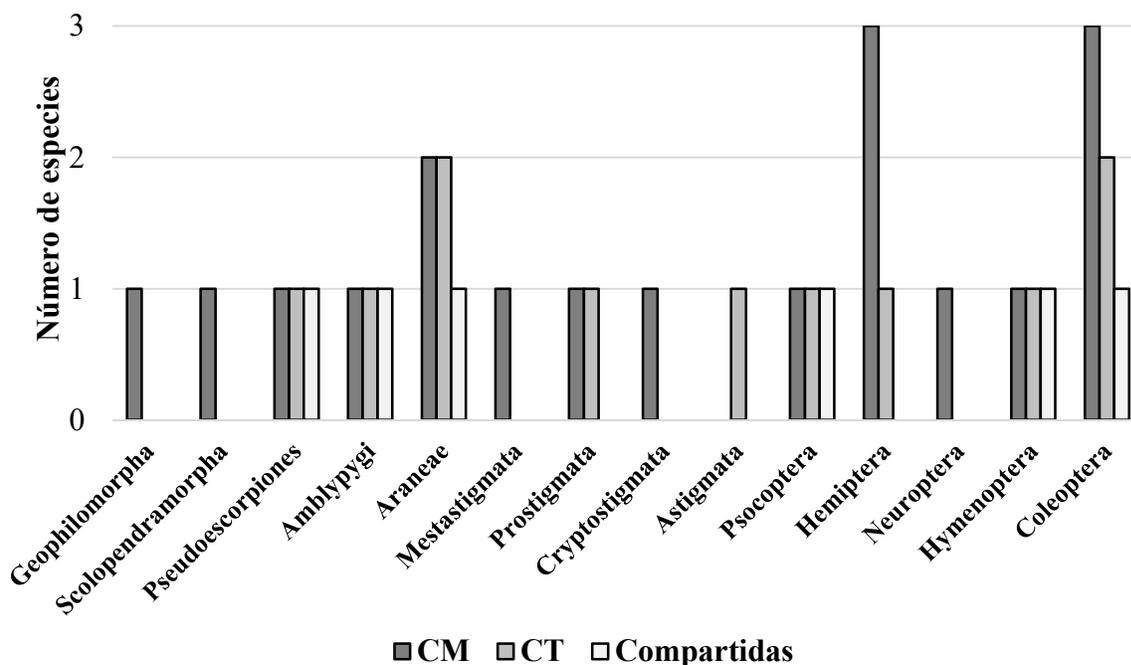


Figura 17. Número de especies de cada uno de los órdenes de artrópodos presentes en la Cueva de la Mariana (CM), Cueva El Tigre (CT) y las especies compartidas.

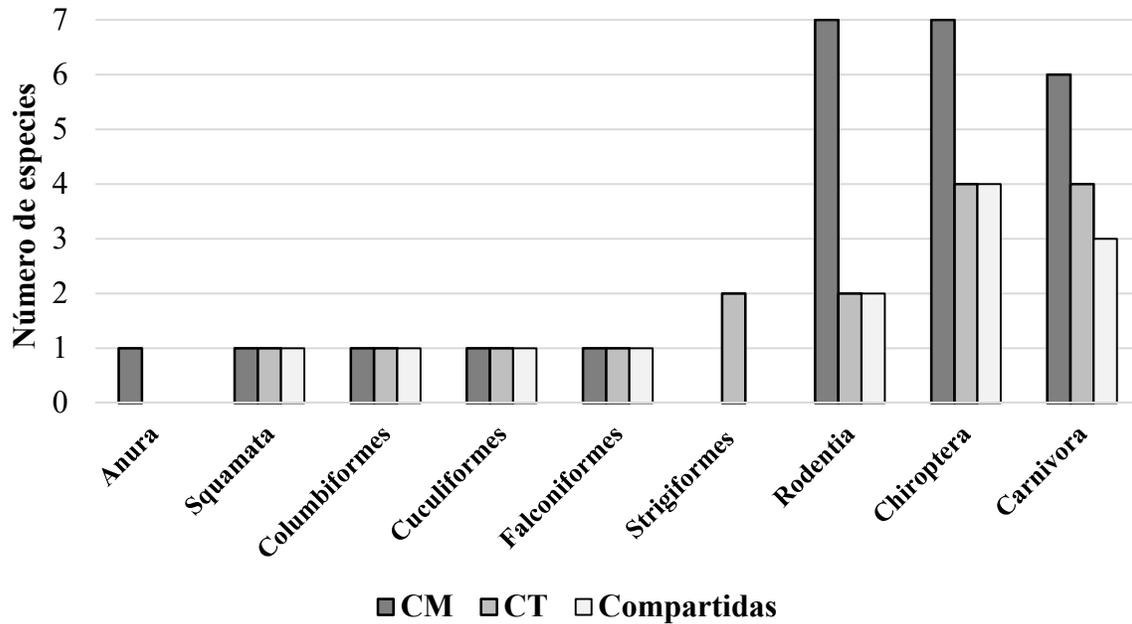


Figura 18. Número de especies de cada uno de los órdenes de vertebrados presentes en la Cueva de la Mariana (CM), Cueva El Tigre (CT) y las especies compartidas.

V.5.2. Fauna cavernícola

Filo Arthropoda

Clase Chilopoda

Orden Geophilomorpha

Familia Geophilidae

Asociado al guano presente en la Cueva de la Mariana se encontró a la especie *Orphnaeus brevilabiatius*, perteneciente a la familia Oryidae, siendo esta una nueva familia reportada en cuevas. Además, en 21 estados de la República se han recolectado los ciempiés geofilomorfos (Cupul-Magaña, 2013), siendo también nuevo registro para Sonora.

Orden Scolopendromorpha

Para la Cueva de la Mariana se encontró a dos individuos del género *Scolopendra*, específicamente en la entrada y en la Sala de los Murciélagos. Cabe mencionar, que dichos individuos son de la misma especie y su presencia se registró únicamente cuando era de noche en la superficie.

Clase Arachnida

Orden Pseudoscorpinidae

Familia Chernetidae

Cuatro especies se han descrito en las cuevas de la península de Yucatán y otras no han sido posible de identificar hasta especie dentro de cuevas de México. De estas especies sin determinar, se ha reportado el género *Neallochernes* (Reddell, 2005; Palacios-Vargas *et al.*, 2014a). La especie *Neallochernes steroreus* se encontró en la Cueva de la Mariana y Cueva El Tigre.

Orden Amblypygi

Familia Phrynidae

El género de *Phrynus* se encontró en ambas cuevas, sin embargo no se ha determinado hasta especies ya que se han colectado ejemplares de talla pequeña, dificultando su identificación a nivel especie, sin embargo, por sus características morfológicas, esta especie es probable que sea la misma en ambas cuevas.

Orden Araneae

Familia Gnaphosidae

El género *Urozelotes* se encontró exclusivamente en la Cueva El Tigre, principalmente en refugios entre las rocas de la cueva. La especie no se ha determinado, sin embargo es el registro dentro de México más norteño hasta el momento.

Familia Pholcidae

De esos nueve géneros, en la Cueva de la Mariana y Cueva El Tigre se encontraron los géneros *Psilochorus* y *Physocyclus*.

El género *Physocyclus* se ha encontrado principalmente en las entradas de las cuevas. En la Cueva El Tigre se colectaron ejemplares de la especie *Physocyclus tanneri* por toda la extensión de la cueva. Dicha especie ya había sido reportado por Hoffmann y col. (2004) para cueva, además de en la Cueva La Higuera del estado de Sonora.

Por otro el género *Psilochorus* fue colectado en la Cueva El Tigre, encontrándose en la Sala de los Murciélagos principalmente. La especie no ha sido posible de determinar, sin embargo el género no se ha reportado para Sonora.

Familia Sicariidae

Para Sonora, en la Cueva de la Mariana y Cueva El Tigre se han colectado especies del género *Loxosceles*, siendo un nuevo registro para Sonora. Particularmente, los ejemplares colectados están asociados a la zona de entrada y zona de transición de las cuevas, ningún ejemplar fue encontrado en las últimas zonas.

Clase Acari

Para este estudio, en ambos ambientes subterráneos se excluyó a los ácaros endoparásitas de los murciélagos, describiéndose exclusivamente los ácaros ectoparásitos.

Orden Metastigmata (Ixodida)

Familia Argasidae

El género *Orthithodoros* fue encontrado en la Cueva de la Mariana, resultado de la extracción del uso el método de Berlese-Tullgren. A pesar que ha sido reportada para varias cuevas de México, este es su primer reporte para Sonora.

Orden Prostigmata (Trombidiformes)

Familia Cheyletidae

Más de cuatro especies de ácaros se han colectado en cuevas mexicanas, sin embargo faltan muchas por describir. El género *Cheyletus* cuenta con dos especies descritas; *C. cacahuamilpensis* de las Grutas de Cacahuamilpa de Morelos, así como en cuevas de Morelos y Yucatán y *C. malaccensis* en cuevas de Tamaulipas y Veracruz (Reddell, 2005; Palacios-Vargas *et al.*, 2014a).

Durante esta investigación se encontraron dos géneros, *Acaropsella* y *Chelachecaropsis* siendo dos géneros nuevos para México. La determinación a especie no ha concluido, y las preservaciones se encuentran en el Laboratorio de Ecología y Sistemática de Microartrópodos de la Facultad de Ciencias de la UNAM, con el Dr. José G. Palacios Vargas y Dra. Blanca E. Mejía Recamier.

Orden Cryptostigmata (Oribatida)

Familia Scheloribatidae

La identificación de la especie encontrada en la Cueva de la Mariana no ha concluido, sin embargo es el registro más norteño de esta familia de ácaros.

Los ejemplares se encuentran en el Laboratorio de Ecología y Sistemática de Microartrópodos de la Facultad de Ciencias de la UNAM, con el Dr. José G. Palacios Vargas y Dra. Blanca E. Mejía Recamier.

Orden Astigmata

Familia Acaridae

Los ácaros de esta familia son terrestres saprófagos, fungívoros, y algunos depredadores. Aun no se ha determinado a nivel género, sin embargo este ácaro se colectó exclusivamente en la Cueva El Tigre. Los ejemplares se encuentran en el Laboratorio de Ecología y Sistemática de Microartrópodos de la Facultad de Ciencias de la UNAM, con el Dr. José G. Palacios Vargas y Dra. Blanca E. Mejía Recamier.

Clase Insecta

Orden Psocoptera

Familia Liposcelidae

Para las cuevas de estudio se encontró la especie *Liposcelis bostrychopila* en ambas, en un solo mes de muestreo, específicamente en el mes de mayo del 2015, a la misma especie reportada en Guerrero, *L. bostrychopila*, siendo nuevo registro para Sonora tanto en cuevas como en el estado.

Orden Hemiptera

Familia Cimicidae

La especie *Primicimex cavernis* es una especie rara parásita de los murciélagos que habitan cuevas y había sido reportada para México (1967), Guatemala (1948) y en E.U.A. (1970, 2003); sin embargo los ejemplares corresponden a preservaciones en colecciones entomológicas, en donde ya no se han visto a ver dentro de su hábitat subterráneo.

Reinhardt y Roth (2013) se dedicaron a encontrar a dicha especie mediante la exploración de siete cuevas de Texas, E.U.A., siendo insatisfactoria la búsqueda. Por ello, en el 2013 publicaron la posibilidad de que esta especie estuviera extinta.

Sin embargo, en la Cueva de la Mariana se encontró una población sana asociada a la especie de murciélago guanero de cola libre *Tadarida brasiliensis*, específicamente en la sección denominada Árbol de los Murciélagos. Este registro se convierte en el más reciente para *P. cavernis*, siendo nuevo para Sonora.

Familia Reduviidae

De las especies que se han reportado para este género, dos se colectaron en las cuevas estudiadas. En el caso de la Cueva El Tigre se colectó a *T. recurva*, encontrándose en la entrada de la cueva.

En la Cueva de la Mariana se encontró otra especie del género pero su identificación a especie no fue realizada por la falta de ejemplares y por tratarse de una ninfa de *Triatoma*.

Además otra especie se encontró en la Cueva de la Mariana, sin embargo no se determinó su género, pero no pertenece al mencionado con anterioridad.

Orden Neuroptera

Familia Myrmeleontidae

Eremeleon longior es la única especie subtroglófila reportada para esta familia en cuevas de México, específicamente en la Península de Yucatán (Palacios-Vargas *et al.*, 2014a).

La Cueva de la Marina presentó la misma especie (*E. longior*), colectada en la sección de la entrada artificial y la Sala de Transición, siendo un nuevo estado con dicha especie.

Orden Hymenoptera

Familia Vespidae

El género *Polistes* se encontró en la entrada de la Cueva de la Mariana y Cueva El Tigre, dicha especie fue la misma para ambas cuevas y se localizaban en la entrada de las cuevas, observándose en sus nidos ubicados en el techo de las cuevas, o en caso particular dentro de una columna en la Cueva de la Mariana.

Orden Coleoptera

Familia Tenebrionidae

El género *Eleodes* se ha reportado para una gran cantidad de cuevas, sin embargo no para Sonora. En la Cueva de la Mariana se colectó una especie de este género, encontrándose por toda la cueva, desde la entrada hasta la parte más profunda. Otro género encontrado en la misma cueva es *Coniontis*, el cual no se ha reportado para Sonora.

Familia Dermestidae

En la Cueva de la Mariana y la Cueva El Tigre se colectó a la especie *Dermestes maculatus*, principalmente en la Sala Murciélagos y Sala Tadarida, respectivamente, donde se encontraba también su estadio larvario.

Familia Carabidae

Varias especies se han reportado dentro de cuevas de México (Reddell, 2005; Palacios-Vargas *et al.*, 2014a). La especie encontrada en la Cueva El Tigre no fue identificada por encontrarse incompleta y solo registrarse dentro de la cueva una sola vez.

FILO CHORDATA

Clase Amphibia

Orden Anura

Familia Bufonidae

Anaxyrus punctatus se encontró en la entrada artificial de la Cueva de la Mariana, aunque solo fue un registro durante el año de muestreo.

Clase Reptilia

Orden Squamata

Familia Viperidae

La especie *Crotalus molossus* fue observada para ambas cuevas, Cueva de la Mariana y Cueva El Tigre, específicamente en las entradas de las cuevas. Además se observó que la especie se encuentra ahí con la finalidad de alimentarse de los murciélagos durante su salida y como refugio a las temperaturas extremas del área.

Clase Aves

Orden Columbiformes

Familia Columbidae

No hay registro de especies para cuevas en México. Se encontró a la especie *Zenaida sp.* en ambas cuevas, encontrándose en la entrada de las cuevas estudiadas.

Orden Cuculiformes

Familia Cuculidae

La especie *Geococcyx atratus* encontrada en la Cueva de la Mariana y Cueva El Tigre es el primer registro para cuevas en México.

Orden Falconiformes

Familia Cathartidae

En Sonora no había antecedente de su presencia en cuevas. En esta investigación, se reporta la misma especie *Coragyps atratus* para las dos cuevas de interés, Cueva de la Mariana y Cueva El Tigre.

Orden Strigiformes

Familia Strigidae

Sonora es el primer estado en reportar la presencia de la especie *Bubo virginianus* dentro de la Cueva El Tigre.

Familia Tytonidae

En la Cueva El Tigre se encontró a *Tyto alba* dentro de la cueva, en la sección de la entrada.

Clase Mammalia

Orden Rodentia

Familia Muridae

El género *Peromyscus* se registró para las cuevas que se están investigando. En la Cueva de la Mariana su presencia se registró durante todos los muestreos realizados, mientras que en la Cueva El Tigre se registró solo una vez dentro de dicha cueva. Los registros anteriores de *Peromyscus* no reportan ejemplares para Sonora.

Sigmodon es otro de los géneros reportados en cuevas de mexicanas y su presencia también fue registrada en la Cueva de la Mariana.

El género *Reithrodontomys* es el primer registro para México dentro de sus cavidades subterráneas, localizada en la Cueva de la Mariana en Sonora.

Familia Heteromyidae

La especie perteneciente al género *Perognathus* no había sido reportado para otras cuevas mexicanas. Dicha especie se encontró en la parte profunda de la Cueva de la Mariana.

Familia Sciuridae

La familia de las ardillas tampoco había sido observada en cuevas. *Ammospermophilus harrisii* fue exclusiva de la Cueva de la Mariana, mientras que *Spermophilus variegatus* se ubicó tanto en esa cueva como en la Cueva El Tigre.

Orden Chiroptera

Familia Molossidae

Nyctinomops y *Tadarida* son los géneros pertenecientes a dicha familia, colectándose en varios estados de la República Mexicana, incluyendo Sonora.

La especie *Tadarida brasiliensis* ha sido registrada en Sonora, específicamente en la Cueva El Tigre, pero también encontrándose en la Cueva de la Mariana; sin embargo la mayor población se ubicó en la Cueva El Tigre, siendo una cueva de maternidad para esta especie durante los primeros meses de la primavera debido a la presencia de las crías dentro de la cueva.

Familia Mormoopidae

La especie *Mormoops megalophylla* se había reportado para la Cueva El Tigre, sin embargo en esta ocasión solo se encontró en la Cueva de la Mariana. Por otro lado, se colectó la especie *Pteronotus davyi* en ambas cuevas, ubicándose en las secciones profundas de las cuevas.

Familia Natalidae

Esta familia se encuentra representada por *Natalus mexicanus*, la cual se ha reportado en 19 estados de México, incluyendo a Sonora. De nueva cuenta, el registro en Sonora corresponde a la Cueva El Tigre (Cockrum y Bradshaw, 1963; Palacios-Vargas *et al.*, 2014a).

La especie *Natalus mexicanus* fue encontrada en la Cueva El Tigre de nuevo, así como en la Cueva de la Mariana, siendo un población que no superaba a los 100 individuos.

Familia Phyllostomidae

La especie *Leptonycteris yerbabuena* no se encontró en esta ocasión en la Cueva El Tigre, sino en la otra cueva cercana y destacando la presencia de hembras preñadas durante los meses de febrero a abril del 2016. En cambio *M. californicus* estuvo presente en todo el año para ambas cuevas, observándose en las últimas salas en los meses de invierno.

Familia Vespertilionidae

En esta ocasión *Myotis velifer* solo se presentó en la Cueva de la Mariana, utilizándola como cueva de maternidad, ya que se observó la percha de las hembras y sus crías en la dicha cueva durante el mes de mayo.

Orden Carnivora

Familia Canidae

La zorra gris *Urocyon cinereoargenteus*, es el único representante para esta familia dentro de cuevas (Reddell, 2005). En la Cueva de la Mariana y Cueva El Tigre se encontró a la zorra gris *Urocyon cinereoargenteus*, así como rastros (letrinas) hasta la sección de penumbra, ubicada no más allá de 50 metros de las entradas.

Familia Felidae

No hay registros para esta familia para cuevas en México. En Sonora se encontraron al gato montés *Lynx rufus* en la entrada de la Cueva de la Mariana y también al *Puma concolor*, fotografiado en ambas cuevas pero solo en una ocasión.

Familia Procyonidae

El cacomixtle *Bassariscus astutus* y *Nasua narica* se detectaron dos veces exclusivamente en la entrada de la Cueva de la Mariana en Sonora.

Familia Mephitidae

Una especie de esta familia se ha reportado para cueva mexicana y corresponde al zorrillo manchado *Spilogale gracilis*, reportado únicamente en Sonora en la Cueva El Tigre. Dicha especie ha vuelto aparecer en la Cueva El Tigre, así como para la Cueva de la Mariana, encontrándose por todos los rincones de ambas cuevas.

Se detectó a otro zorrillo, *Conepatus leuconotus* entrando a la secciones más superficiales dentro de la Cueva El Tigre durante la noche exclusivamente.

V.5.3. Curvas de acumulación de especies de la Cueva de la Mariana y Cueva El Tigre

Los estimadores no paramétricos mostraron que el tiempo de muestreo y las especies observadas fueron suficientes para alcanzar la riqueza de especies esperadas dentro de ambas cuevas, como se aprecia en la Tabla 6.

En la Cueva de la Mariana, los estimadores Chao 2 y Bootstrap obtuvieron un valor de la riqueza de especies esperadas similar o por debajo de los observados en campo, mientras que la riqueza esperada para Jackknife 1 y 2 solo se alcanzó a un 97% y 95%, respectivamente. Para los cuatros estimadores los resultados son favorables ya que se ha establecido que para considerar que el número de muestreos necesarios para un inventario de especies, este debe de albergar el mayor número de especies que la represente dentro de un área, cumpliendo con más del 70% de lo estimado.

Tabla 6. Riqueza observada ($R_{observada}$), riqueza estimada ($R_{estimada}$) y su desviación estándar (s) para especies presentes en la Cueva de la Mariana (CM) y Cueva El Tigre (CT).

		Estimadores no paramétricos				Modelo asintota
		Chao 2	Jackknife 1	Jackknife 2	Bootstrap	Clench
CM						
$R_{observada}$	43					
$R_{estimada}$		43	44	45	39	39
s		5.8228	3.9879	6.3378	2.8629	3.3663
CT						
$R_{observada}$	28					
$R_{estimada}$		28	29	29	28	26
s		2.6715	2.3337	4.1527	1.6047	0.8982

En el caso de la Cueva El Tigre, aplicando los mismos estimadores, la estimación de la riqueza de especies fueron alcanzados según los estimadores Chao 2 y Bootstrap, obteniendo el mismo resultado de especies esperadas con las especies observadas. Los estimadores Jackknife 1 y 2 correspondieron a un 96% de las especies estimadas. Al igual que la Cueva de la Mariana, dichos estimadores soportan la riqueza de especies observada realizada en la Cueva El Tigre.

La ecuación de Clench predijo, al igual que los otros estimadores no paramétricos, la riqueza esperada total de ambas cuevas, basándose en la curva de acumulación generada del comportamiento de los muestreos para ambas cuevas.

La R^2 fue de 0.9910 para el ajuste de la curva para la Cueva de la Mariana, mientras que la para la Cueva El Tigre su R^2 fue de 0.9304.

La riqueza esperada para el modelo de Clench en la Cueva de la Mariana fue de 39 especies posibles, lo cual fue superado por la observada ($n=43$). El comportamiento de lo observado y lo esperado (ecuación de Clench) fue similar, reflejando un crecimiento rápido durante los primeros muestreos, alcanzando el 67% durante las primeras 40 horas de muestreo y agregando nuevas especies poco a poco conforme se avanzó. Véase Figuras 19 y 20.

La Cueva El Tigre superó las 26 especies estimadas por dicha ecuación a las 28 especies observadas y su curva de acumulación de Clench es similar a lo muestreado. En las 20 horas de muestreo se colectó el 89% de las especies.

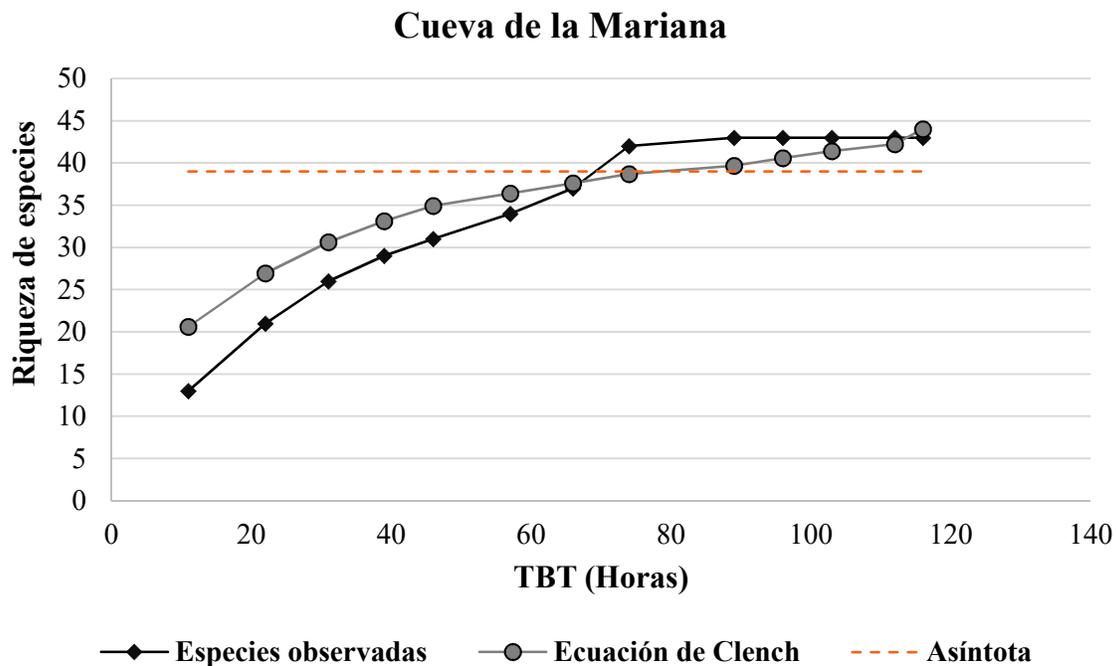


Figura 19. Curva de acumulación de Clench y de especies observadas de ambas en función de su TBT (Tiempo Bajo Tierra), con sus respectivo valor de asíntota (riqueza estimada).

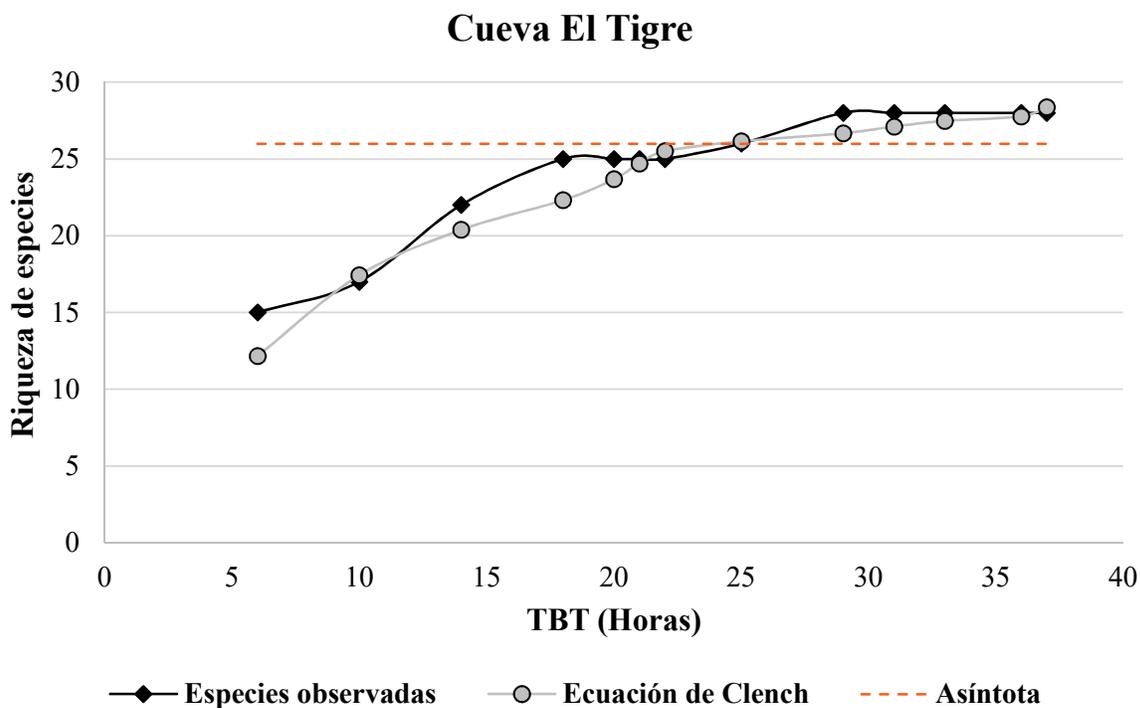


Figura 20. Curva de acumulación de Clench y de especies observadas de ambas en función de su TBT (Tiempo Bajo Tierra), con sus respectivo valor de asíntota (riqueza estimada).

V.5.4. Índices de diversidad y de similitud

Los índices de diversidad empleados fueron el Índice de Simpson e Índice de Shannon-Wiener. Para el primer índice en la Cueva de la Mariana se obtuvieron valores de 0.2455, que al ser un número cercano a cero se considera que no hay una fuerte dominancia por parte de la riqueza de especies colectada, su contraparte (1-D) muestra un valor alto 0.7544 que indica la diversidad de las especies en dicha cueva. La Cueva El Tigre presentó un valor de 0.5535, por lo que existe una fuerte dominancia de alguna de las especies presentes dentro de ella (Tabla 7).

Por ello, la fauna de la Cueva de la Mariana es más diversa que la de la Cueva El Tigre, sin embargo, la mayor abundancia/dominancia se encuentra dentro la cueva más pequeña, la Cueva El Tigre.

Para el caso del Índice de Shannon-Wiener los valores para ambas cuevas fueron menores a lo establecido (≥ 3) para considerar un área como muy diversa. Sin embargo, la Cueva de la Mariana es más diversa que la Cueva El Tigre (Tabla 7).

Tabla 7. Índices de diversidad aplicados a la diversidad faunística presente en la Cueva de la Mariana (CM) y Cueva El Tigre.

	Índices de diversidad		
	Simpson (D)	Simpson (1-D)	Shannon-Wiener
CM	0.2455	0.7544	1.5363
CT	0.5535	0.4464	0.8819

Para establecer si existe una diferencia significativa entre el índice de diversidad obtenido entre las dos cuevas, se realizó una prueba *t* de Hutchenson.

Los valores del índice de diversidad ponderada y varianza para ambas cuevas fue de $H_{p1} = 0.6672$ y $S^2 = 1.88 \times 10^{-6}$ para la Cueva de la Mariana y de $H_{p2} = 0.3830$ y $S^2 = 2.24 \times 10^{-6}$ para la Cueva El Tigre. Con base a estos valores la *t* calculada fue de 139.82.

El valor de la distribución de *t* con un valor de significancia de 95% y 99% fue de $t_{(0.05)} = 1.64$ y $t_{(0.01)} = 2.32$, respectivamente. Como el valor de *t* obtenido (139.82) es mayor que el valor de *t* en tablas, se concluye que la diversidad de la Cueva de la Mariana y Cueva El tigre no es misma, es decir, existe diferencia significativa en la diversidad faunística entre las dos cuevas.

Después de encontrar que cada una de las cuevas alberga una diversidad distinta, se utilizaron índices para determinar su similitud en referencia con las especies compartidas entre ambas cuevas. Se aplicaron cuatro índices con valores cualitativos (presencia-ausencia) y cuantitativos (proporción de individuos).

Los índices cualitativos proporcionaron, en general, valores menores, al igual que los datos cuantitativos, siendo el Índice de Sørensen el valor más alto obtenido, indicando que la diversidad de ambas cuevas son similares (Tabla 8).

Tabla 8. Índices de similitud aplicados a la diversidad faunística compartida entre la Cueva de la Mariana y Cueva El Tigre.

Índices de similitud/disimilitud					
Cualitativos				Cuantitativos	
Jaccard	Sørensen	Sokal & Sneath	Braun-Blaquet	Sørensen	Morisita-Horn
0.3653	0.5352	0.2235	0.4418	0.3466	0.4845

A partir de los valores de similitud (s), se puede calcular fácilmente la disimilitud (d) al ser la contraparte de los valores de los índices aplicados ($d=1-s$). Con base a estos índices, los valores de disimilitud obtenidos son altos, por lo que se concluye que, a pesar de poseer especies en común, su identidad como cueva es única para cada una de ellas.

V.5.5. Biotopo

En la Cueva de la Mariana se encontraron tres tipos de biotopos: Biotopo Entrada, Biotopo Estructuras Parietales y Biotopo Guano (Figura 21), mismo que se encontraron en un trabajo similar por Aguilar-Morales y Ruíz-Castillo (1995).

El Biotopo Entrada fue dominado principalmente por el grupo de los vertebrados, representado por siete ordenes distintos, sin embargo también hubo invertebrados que se encontraban exclusivamente en las entradas.

El Biotopo Estructura Parietal está conformado por áreas específicas dentro de la cueva, por ejemplo entre fisuras, rocas, espeleotemas, por encima del suelo o guano. Este fue el dominante considerando ambos grupos, siendo representado por el orden de los quirópteros.

El Biotopo Guano fue exclusivo de los invertebrados, donde el 50% del total de artrópodos que se colectaron están asociados al guano.

La Cueva El Tigre presentó los mismos biotopos, y las especies que integraron cada uno de ellos, fue similar con respecto a la Cueva de la Mariana (Figura 22).

El Biotopo Entrada fue el que mayor número de especies y por ende, el mayor número de ordenes asociados a dicho biotopo. De esos, diez especies de vertebrados se encontraron exclusivamente en la zona de entrada y una especie de artrópodo.

La composición de artrópodos y vertebrados fue muy similar con respecto al biotopo de estructuras parietales dentro de la cueva, siendo el techo y las fisuras los mayores representantes. El grupo de los murciélagos fue el mayor orden detectado dentro de la cueva, asociado al techo de las distintas salas dentro de la cueva, con un total de siete especies para la Cueva de la Mariana y cuatro especies en la Cueva El Tigre, compartiendo dichas especies con

la Cueva de la Mariana. Por otro lado, el orden Araneae fue exclusivo de este biotopo, encontrándose entre rocas depositadas en el suelo/guano.

Por último, de nueva cuenta el 50% de las especies de artrópodos se encontraron asociados al Biotopo Guano, siendo exclusivo para el grupo de los invertebrados.

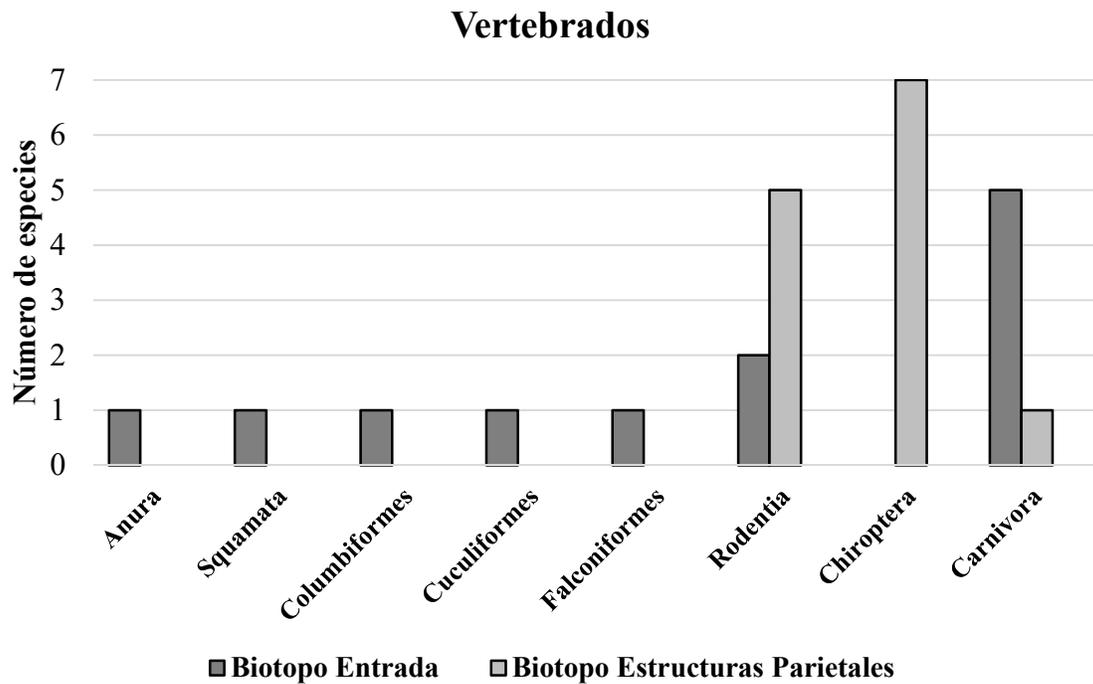
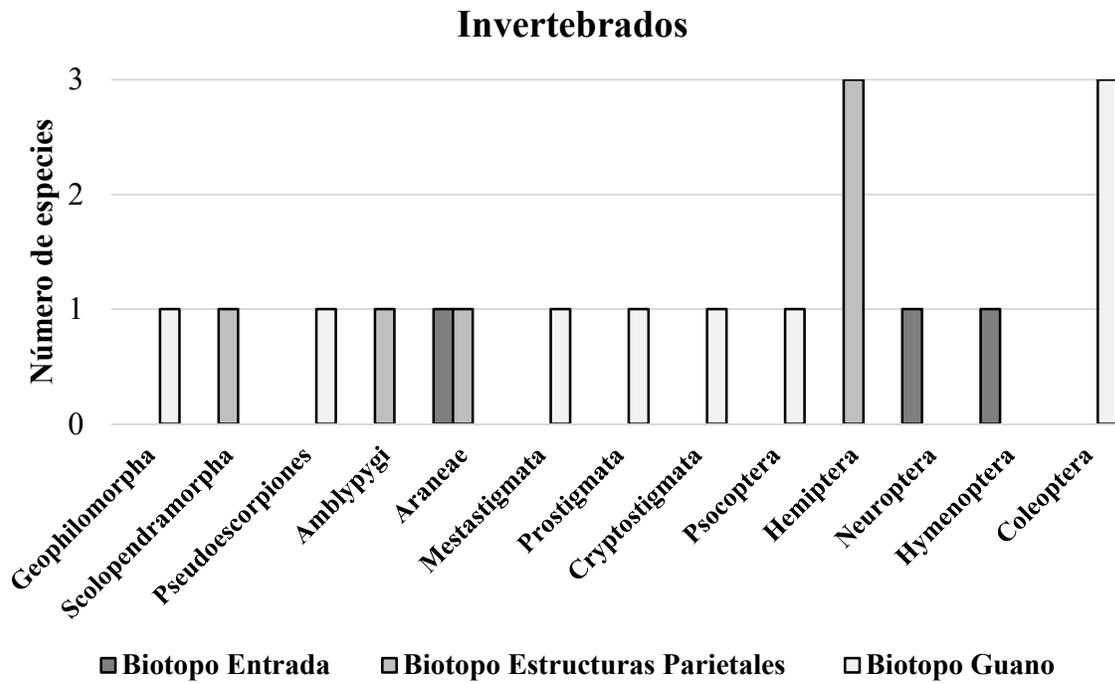


Figura 21. Biotopos para los invertebrados y vertebrados dentro de la Cueva de la Mariana con el número de especies para cada uno de los órdenes presentes en dicha cueva.

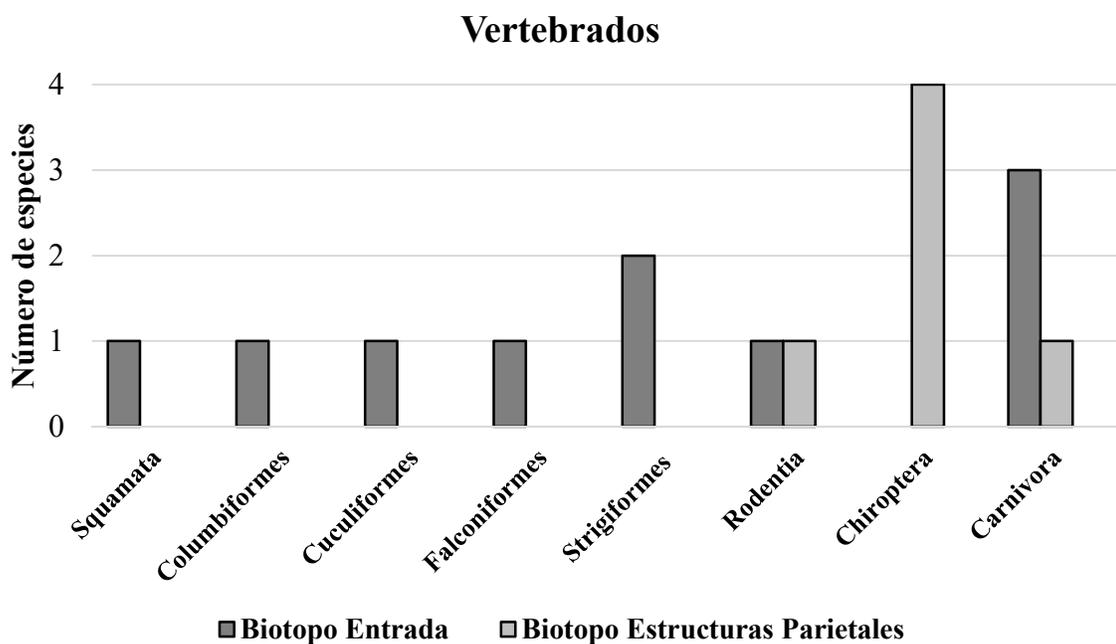
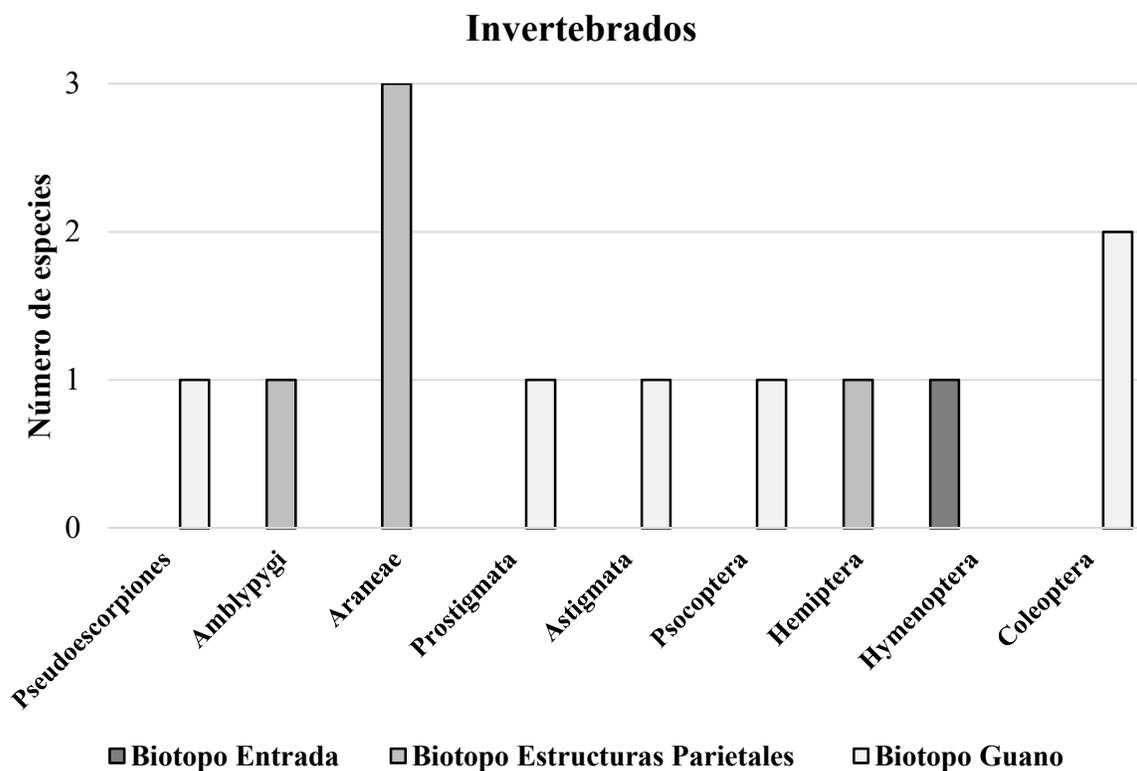


Figura 22. Biotopos para los principales órdenes de invertebrados y vertebrados dentro de la Cueva El Tigre con el número de especies presentes en dicha cueva.

V.6. Correlaciones

El coeficiente de correlación nos indica una relación positiva entre la abundancia total con respecto a las variables ambientales (temperatura y humedad relativa) específicamente de la zona profunda, ya que ahí se alojó la mayor abundancia y riqueza de especies en la Cueva de la Mariana (Tabla 9), a contrario a la Cueva El Tigre donde las variables ambientales indicaron que la relación de la abundancia total con la temperatura y humedad es inversa (Tabla 10).

Tabla 9. Resultados del coeficiente de correlación para las variables ambientales y biológicas en función de la diversidad faunística (abundancia total de las especies encontradas) en la Cueva de la Mariana.

	Temperatura	Humedad Relativa	Abundancia total	
Temperatura	1			
Humedad Relativa	0.4455	1		
Abundancia total	0.7906	0.7552	1	

	<i>Tadarida brasiliensis</i>	<i>Neallochernes steroreus</i>	<i>Acaropsella</i>	<i>Primicimex cavernis</i>
<i>Tadarida brasiliensis</i>	1			
<i>Neallochernes steroreus</i>	-0.4716	1		
<i>Acaropsella</i>	-0.1125	0.1281	1	
<i>Primicimex cavernis</i>	0.0371	0.1680	0.9042	1

Tabla 10. Resultados del coeficiente de correlación para las variables ambientales y biológicas en función de la diversidad faunística (abundancia total de las especies encontradas) en la Cueva El Tigre.

	Temperatura	Humedad Relativa	Abundancia total	
Temperatura	1			
Humedad Relativa	0.7105	1		
Abundancia total	-0.3810	-0.7227	1	

	<i>Tadarida brasiliensis</i>	<i>Neallochernes steroreus</i>	<i>Dermestes maculatus</i>	<i>Physocyclus tanneri</i>
<i>Tadarida brasiliensis</i>	1			
<i>Neallochernes steroreus</i>	-0.3473	1		
<i>Dermestes maculatus</i>	-0.4098	0.6738	1	
<i>Physocyclus tanneri</i>	-0.7153	0.5596	0.6237	1

Con respecto a las especies guanobias y la población de *Tadarida brasiliensis* se encontró una relación negativa para ambas cuevas.

V.7. Red trófica

Con base a los niveles tróficos para cada uno de los biotopos se observó un grado de dependencia de toda la fauna cavernícola presente en ambas cuevas con la comunidad de murciélagos, principalmente con la población de *Tadarida brasiliensis* (Figura 23).

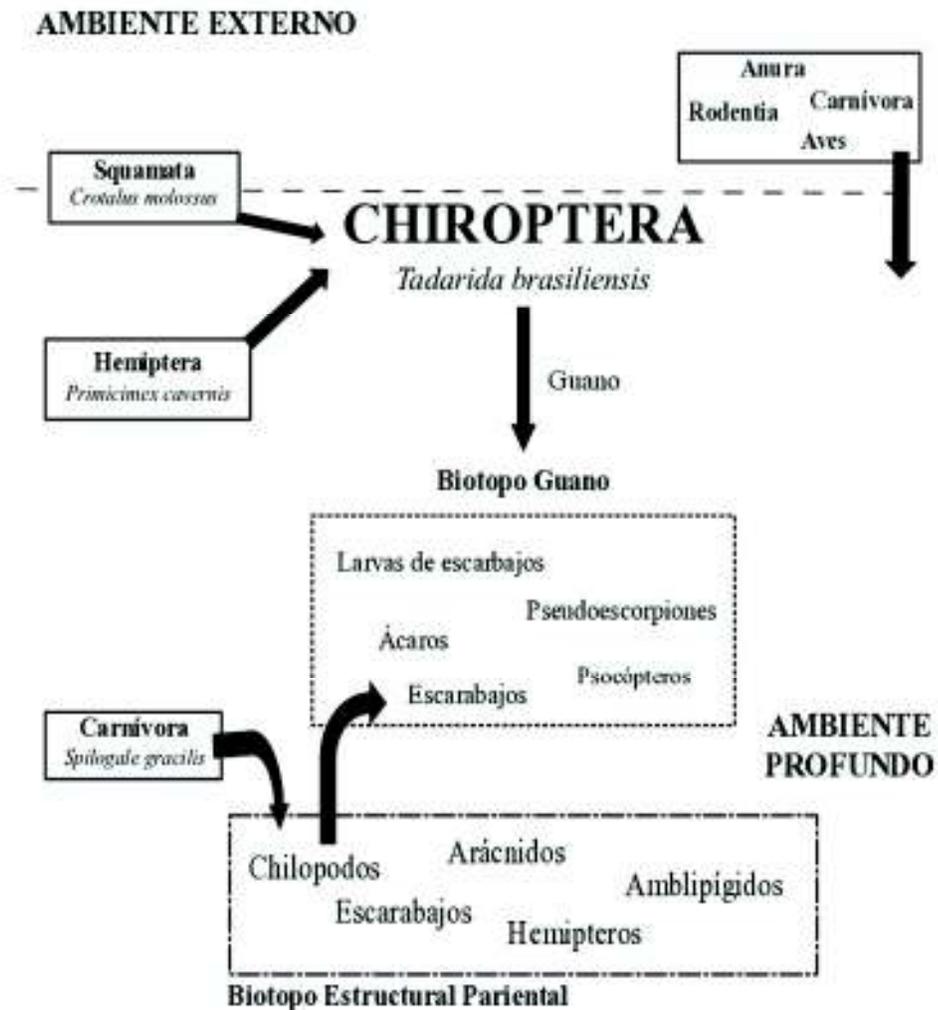


Figura 23. Modelo hipotético del flujo de energía del exterior al interior de la Cueva de la Mariana con sus niveles tróficos detectados, siendo muy similar el de la Cueva El Tigre.

Un total de 15 especies son dependientes del guano producido por los murciélagos, representando más el 30% del total de especies encontradas para ambas cuevas. Esto se refleja en su presencia dentro del guano y por ser especies que se usan el guano como alimento y sustrato para completar su ciclo biológico (Aguilar-Morales y Ruíz-Castillo, 1995; Palacios-Vargas *et al.*, 2014a).

La mayoría del grupo de los vertebrados encontrados, son especies que no dependen de los murciélagos, sino contribuyen en pocas cantidades a la red trófica al incorporar materia orgánica a la cueva.

VI. DISCUSIÓN

VI.1. Cueva de la Mariana y Cueva El Tigre

Las dimensiones entre ambas cuevas fueron un factor determinante para la diversidad encontrada, ya que en la Cueva de la Mariana siendo la más grande, está contuvo la mayor riqueza de especies, que la Cueva El Tigre.

Según Armienta y colaboradores (2011), el área que abarcan la Cueva de la Mariana y la Cueva El Tigre es de las unidades más antiguas registradas para Sonora, de hace 500 millones de años, aproximadamente. Debido a su similar edad, composición y fracturamientos y fallas, y la cercanía entre las dos cuevas, se esperaría una formación similar para ambas cuevas, sin embargo la Cueva de la Mariana es tres veces la Cueva El Tigre.

La razón de esto, se debe a que la Cueva El Tigre tiene en sus alrededores una unidad geológica conformada por rocas intrusivas ígneas, las cuales sirvieron de “límite” para la ampliación de la cueva, ya que este tipo de roca ígnea no se disuelve por la acción química del agua como en las rocas calizas.

A pesar de eso, ambas cuevas fueron colonizadas por una variedad de especies.

VI.2. Clima de la Cueva de la Mariana y Cueva El Tigre

A pesar de que ambas cuevas presentan una entrada muy amplia, su formación hace que el área de penumbra comience a los pocos metros de su exploración, ya que posee túneles de boca pequeña en donde delimita el acceso de la luz y comienza la zonas de completa oscuridad, un ambiente favorable desde el inicio de la cueva para las especies subterráneas y eutroglófilas (Hoffmann *et al.*, 1986; Galán, 1993; Galán y Herrera, 1998; Romero, 2009).

En el caso de la temperatura media anual registrada para el periodo de estudio, algunos autores (Moore y Sullivan, 1997; Galán y Herrera, 1998; Palmer, 2012) mencionan que dicha temperatura está influenciada por la región externa en donde se ubique la cueva. La temperatura

media anual del ambiente circundante (ambiente superficial) es de 22.1 °C (CONAGUA, 2010), mientras que la temperatura media anual de la Cueva de la Mariana fue en la Sala Transición (zona transición) de 22.62 °C y en la Sala de los Murciélagos (zona ventilada) fue de 26.54 °C. En la Cueva El Tigre en la Sala Amonio (zona ventilada) fue de 31.27 °C y de 29.27 °C.

La temperatura del primer sensor (Sala Transición) es similar a la temperatura media anual del ambiente exterior, sin embargo esto se debe a que la Cueva de la Mariana posee dos entradas, una natural y una artificial, la cual, esta última fue realizada con la finalidad de crear un atajo para la colecta de guano. Esta nueva entrada alteró la circulación del aire dentro de dicha cueva y por ende, la temperatura y su humedad. Palmer (2012) ha señalado que la modificación o creación de una entrada puede alterar por completo el clima interno de la cueva. Durante los muestreos se observó una gran cantidad de guano seco en la Sala Transición y Sala Mosaico, el cual no hubo una incorporación de nuevo guano, a excepción de una pequeña población de *Tadarida brasiliensis* que se colocó en la Sala Transición cerca del área de penumbra, pero de manera momentánea. Es posible que debido a la entrada artificial, el clima interno de esa sala cambió drásticamente para las especies especializadas a un clima estable como en el caso de los murciélagos que perchan en zonas con poco movimiento de aire y temperaturas estables (Cruz, 2008), por lo que migraron a salas más profundas y por consecuencia la fauna asociada a ellos, se desplazaron a las secciones más profundas. Esto se aprecia en la preferencia de todas las especies de murciélagos a las últimas salas donde el clima es más estable, además de ahí encontrarse el mayor número de especies y la poca acumulación de guano a pesar de las poblaciones constantes de quirópteros. La temperatura de las últimas salas fue superior a la de la Sala Transición y muy por encima de la media anual externa.

La Cueva El Tigre obtuvo valores superiores a la media anual del ambiente superficial, registrando valores superior a los 28 °C durante todo el año e incrementando cuando la población de *Tadarida brasiliensis*.

En el caso de la humedad de ambas cuevas, fue por debajo a lo que se considera como ambiente subterráneo (Trombe, 1952; Hoffmann *et al.*, 1986; Galán, 1993; Carabajal *et al.*, 1996). Debido a que la cueva se encuentra en un ambiente semidesértico, la humedad está influenciada por dicho ambiente. Aunque no se registró una humedad alta, a comparación del ambiente desértico del exterior, el nivel de humedad contenido dentro de las cuevas fue

superior, ya que en la Cueva de la Mariana fue entre 53% y 54%, para cada una de sus salas y en la Cueva El Tigre de 62% a 64% de humedad media anual en su zona de transición y zona profunda, respectivamente y puede ser la razón por lo que muchas especies colonizaron los ambientes de cuevas. En las cuevas, las diferencias de temperatura y humedad relativa pueden alcanzar de 5-6 °C y 30% de humedad relativa (Carabajal *et al.*, 1996, Galán y Herrera, 1998), lo que se encontró para la temperatura y la humedad en los zonas de transición de cada una de las cuevas, sin embargo su área profunda, estos valores superaron a lo establecido en cuevas Trombe, 1952; Hoffmann *et al.*, 1986; Galán, 1993; Carabajal *et al.*, 1996; Palmer, 2012).

VI.3. Cuevas de calor

Con base a la información climática de ambas cuevas, se observó que la media anual de temperatura y humedad eran altas a comparación a lo reportado por otros autores (Galán y Herrera, 1998; Palmer, 2012) para cuevas ventiladas o de grandes dimensiones, sobre todo en la seccionas más profunda o asociada a los murciélagos.

El sensor colocado en la Sala Transición de la Cueva de la Mariana fue el único que obtuvo valores correspondientes a la temperatura media anual externa, posiblemente por estar en contacto con dos entradas, lo que influye fuertemente los valores registrados. Los demás sensores registraron valores altos de temperatura y humedad para las salas más profundas e inclusive la Cueva El Tigre, ambos sensores registraron valores por encima de los 28 °C.

La causa de esta temperatura y una alta humedad se debe a la presencia de una gran población de murciélagos, en caso particular, de la especie *Tadarida brasiliensis* para ambas cuevas, la cual estuvo presente durante toda el tiempo de la investigación. Su población incrementó a partir del mes de mayo, en donde para el mes de julio de 2015 en ambas cuevas se contabilizó una población cercana al medio millón de individuos. Sin embargo, este fue el pico máximo alcanzado por la Cueva de la Mariana. Por otro lado, la población de *T. brasiliensis* en la Cueva El Tigre alcanzó una población de más del millón de individuos durante el mes de septiembre de 2015, abarcando toda el área de la cueva. La acumulación de guano y su descomposición modifica el clima interno de la cueva, siendo la actividad biológica responsable del clima tan particular que se encontró en ambas cuevas.

Autores como Hoffmann y colaboradores (1984), Armas *et al.* (1988) y Montero-García han señalado las características de una “cueva de calor”, definiéndose como cuevas que presentan una entrada muy reducida, una temperatura igual o superior a los 28°C, con respecto a la temperatura media anual del ambiente superficial y una alta humedad relativa con respecto al ambiente externo. En algunos casos, causado por la actividad biológica de los murciélagos presentes dentro de las cuevas.

Debido a esta información, ambas cuevas se clasifican como “cuevas de calor”, principalmente la Cueva El Tigre, ya que por las dimensiones de la Cueva de la Marina, dicha cueva actúa como “cueva de calor” de manera intermitente en sus salas más profundas.

VI.4. Zonación de la Cueva de la Marina y Cueva El Tigre

Una cueva está contemplada como un ambiente estable y sumergido en la completa oscuridad, sin contradecir las creencias populares del ambiente de una cueva, estas áreas se encuentran en las secciones más profundas de una cueva.

Algunos autores (Galán, 1993; Galán y Herrera, 1998; Galán, 2004) han sugerido que la delimitación de las zonas físicas de una cueva es un criterio arbitrario, sin embargo con la mayor información posible es factible una correcta delimitación entre zona y zona.

Con el mapa de la cueva y el clima registrado durante el trabajo, se encontraron tres de las cuatro posibles zonas físicas que se han establecido para una cueva, siendo la zona profunda la excepción para ambas cuevas, por lo que se puede determinar que dentro de las secciones que abarcaron el estudio, no se encontró la zona que corresponde a la definición de ambiente subterráneo, lo cual también se refleja por la nula colecta de especies potencialmente troglóbias.

VI.5. Recurso energético de la Cueva de la Mariana y Cueva El Tigre

Como se ha estado mencionado anteriormente que dentro de las cuevas se han registrado poblaciones de diferentes especies de murciélagos que perchan o que emplean las cuevas como cuevas de maternidad durante todo el año. De esto se infiere que existe una gran acumulación de guano, principalmente por la población de *Tadarida brasiliensis* dentro de ambas cuevas.

Culver y Pipan (2009) establecieron que los recursos energéticos de una cueva proviene del exterior, describiendo a seis mecanismo involucrados en diferentes cuevas del mundo. Una de estas fuentes de alimento para las especies que habitan dentro de cuevas fue el guano, el cual es proporcionado por el movimiento activo de fauna a las cuevas.

Este mecanismo es típico en cuevas terrestres, en donde el guano generado por las poblaciones de quirópteros son la fuente principal para las redes tróficas presentes y se ha reportado por Aguilar-Morales y Ruíz-Castillo (1995) que la alteración o remoción de las poblaciones de murciélagos puede provocar la extinción del 94% del total de la fauna presente.

VI.6. Diversidad faunística cavernícola

Desde los inicios de la bioespeleología moderna, Racovitza (1907) ha mencionado que la diversidad faunística de una cueva es tan amplia que solo el ambiente es lo que tienen en común y para esta ocasión, la Cueva de la Mariana y Cueva El Tigre no fue la excepción.

Según Romero (2009) la riqueza de una cueva representa una parte del ambiente exterior, y eso fue lo que obtuvo en ambas cuevas. En la Cueva de la Mariana y Cueva El Tigre presentaron una riqueza de especies compuesta por varios órdenes, familias y géneros.

Un ejemplo de esto, fue que en el orden de los murciélagos, se identificaron cinco familias de las siete especies registradas. En Sonora se han reportado ocho familias de quirópteros (Medellín *et al.*, 2008) por lo que solamente la Cueva de la Mariana presentó más del 50% de las familias para Sonora.

A diferencia de lo reportado por varios autores (Hoffmann *et al.*, 1986; Hoffmann *et al.*, 2004; Reddell, 2005; Palacios-Vargas *et al.*, 2014a), donde establecen que la principal fauna reportada en cuevas es el grupo de los invertebrados, específicamente los artrópodos, en estas cuevas encontramos una riqueza equitativa entre invertebrados y vertebrados.

Con base a la clasificación ecológica de la fauna cavernícola, establecimos que se encontraron tres de las cuatro grupos dentro de esta cueva. Los troglóxenos ($n=15$) fueron representados por mamíferos medianos y grandes, aves y uno que otro invertebrado; los subtroglófilos ($n=14$) representando de nueva cuenta por mamíferos e artrópodos, dominado

por el orden Chiroptera y Rodentia; los eutroglófilos ($n=4$) representados por el orden Geophilomorpha, Araneae, Hemiptera y Pseudoscorpiones. Por el momento, no se encontraron especies que representen a la última clasificación (troglobios) ya que no se encontró las condiciones del ambiente subterráneo.

Al utilizar los índices de diversidad y similitud encontramos que ambas cuevas son diferentes, y que las especies que comparten entre ellas no son lo suficiente para indicar que su composición es la misma. Sin embargo, utilizando el índice de Simpson encontramos que la Cueva de la Mariana presenta más riqueza, mientras que la Cueva El Tigre tuvo una menor equitatividad.

El índice de Shannon-Wiener demostró que la diversidad de ambas cuevas es baja debido a los valores obtenidos, pero si se ha establecido que una cueva representa una parte de la diversidad externa, es entendible que exista una diversidad relativamente baja para ellas. Por otro lado, existen muchos trabajos de inventarios bioespeleológicos (Mitchell y Reddell, 1973; Reddell, 1977; Palacios-Varga *et al.*, 1985; Palacios-Vargas, 1993a; Aguilar-Morales y Ruíz-Castillo, 1995; Hoffmann *et al.*, 2004, Reddell, 2005; Reddell, 2006; Bribiesca-Contreras y Solís Marín, 2014; Palacios-Vargas *et al.*, 2014a), en los cuales no se han aplicado índices para determinar si los muestreos son lo suficientemente exhaustivos para tener la probabilidad de coleccionar la mayor riqueza en cuevas y poder comparar los inventarios bioespeleológicos de otras cuevas.

Por último, con base a la publicación más reciente de la lista de cuevas más diversas para México (Palacios-Vargas *et al.*, 2014a), la Cueva de la Mariana se coloca en el puesto 16, con 34 especies cavernícolas, siendo eliminadas las especies que tuvieron un solo registro en todo el año, ya que la publicación mencionada registra especies que frecuentan o son común dentro de la cuevas mexicanas.

Con esto la Cueva de la Mariana superó a las Grutas de Cacahuamilpa de Guerrero (30 especies) y la Cueva del Nacimiento del Río San Antonio en Oaxaca (30 especies).

VI.7. Biotopo

Tres fueron los biotopos detectados para ambas cuevas, en ambos ambientes se excluyó a las especies endoparásitas de los murciélagos.

El ambiente más superficial que corresponde a la zona de entrada y penumbra estuvo ocupado principalmente por especies de vertebrados.

La Cueva de la Mariana fue utilizada mayormente por mamíferos, que usaban la cueva como refugio a distintas horas y la Cueva El Tigre dominado por aves y pocos mamíferos. Algunos autores (Aguilar-Morales y Ruíz-Castillo, 1995; Reddell, 2005; Palacios-Vargas *et al.*, 2014a) han mencionado una gran diversidad de especies de vertebrados que se albergan en los primeros metros de las cuevas, sin embargo esos autores no reportan a la entrada como biotopo, sino un enfoque de un refugio momentáneo.

El uso de cámara-trampas no solo nos benefició para conocer que especies “visitaban” las cuevas, si no se encontró un uso de la cueva más allá de un refugio a las condiciones adversas.

En la Cueva de la Mariana la zorra gris *Urocyon cinereoargenteus* y el gato montés *Lynx rufus* emplearon la cueva constantemente durante los primeros meses del estudio (abril a julio de 2015) utilizando la cueva como el lugar para alimentarse después de cazar sus presas, con el fin de reducir la competencia mientras se alimentaban.

En el caso de la Cueva El Tigre, el zopilote negro *Coragyps atratus* demostró una estrecha relación con la entrada de la cueva y su ciclo reproductivo, ya que durante el estudio se encontraron dos crías de dicha especie protegidas en zonas donde la concentración de amonio es alta según McFarlane y colaboradores (1995), posiblemente escondidas de potenciales depredadores. Conforme paso el tiempo, los polluelos se desarrollaron dentro de la cueva hasta obtener su plumaje de adulto. Durante todo este proceso, se observó a la hembra enseñando el vuelo y la termorregulación a las crías. Posteriormente, al concluir con el periodo de muestreo, se encontraron dos huevos de zopilote negro *C. atratus* en la misma área de la entrada, repitiendo el ciclo dentro de esta cueva. Cabe señalar que en exploraciones previas al estudio (2014), se registró la presencia de dos huevos de zopilote negro. Siendo tres años seguidos la puesta de huevos en esta cueva.

A la par de los individuos de zopilote negro *C. atratus*, estuvo presente también una hembra de zorra gris *U. cinereoargenteus*, la cual ocupó la cueva con dos cachorros durante los mismos meses que estuvo el zopilote negro *C. atratus*. Dicha hembra se refugiaba y alimentaba a sus crías dentro de la Cueva El Tigre, e inclusive hubo registros fotográficos donde se observa la interacción entre ambas especies, siendo una interacción biológica neutral.

Debido a estos ejemplos se consideró el biotopo entrada, ya que ciertas especies de vertebrados utilizan las cuevas como parte de su ciclo biológico, y aunado a esto, aunque la mayoría de los registros de vertebrados fueron en una sola ocasión.

En trabajos como Piña y colaboradores (2004) que utilizaron más de 88 cámaras para diferentes ambientes en Sonora durante dos años, registraron 18 especies, mientras que con el uso de dos cámaras, una en cada entrada, este trabajo registró diez, de las cuales el 50% de los mamíferos estuvieron presente en el estudio de Piña *et al.* (2004).

El siguiente biotopo es el que se originó por la intervención de los murciélagos, siendo el guano, el cual fue un sustrato que se depositó en diferentes secciones de ambas cuevas. El guano fresco estaba asociado la presencia de la diferentes especies de quirópteros que se identificaron, siendo todos de hábitos insectívoros a excepción de *Leptonycteris yerbabuena*. Después de la abundancia de las poblaciones de *Tadarida brasiliensis*, la fauna asociada al guano fue la más abundante, compuesto principalmente por larvas de derméstidos, ácaros y pseudoescorpiones.

Las condiciones climáticas en conjunto con el guano hace que la abundancia total de la fauna asociada al guano prevalezca, esto mencionado por Aguilar-Morales y Ruíz-Castillo (1995), que dice que en cuevas que no son consideradas de calor y que presenten temperaturas y humedades relativas bajas, y además que exista la acumulación de guano de murciélagos, procedente de otro tipo de hábitos alimenticios (hematófago y frugívoro), la riqueza de especies es baja.

Por último, el biotopo estructura parietal está asociado a los depredadores que se alimentan de las especies, curiosamente se encuentran en estructuras cercanas al guano pero pocas veces se encontraron sobre el sustrato. La única especie que estuvo en el sustrato de guano fue el ciempiés *Orphnaeus brevilabiatus*, alimentándose de larvas de coleópteros. Las demás invertebrados depredadores estuvieron en rocas, fisuras, y en espeleotemas específicos como

en estalagmitas, estalactitas o en columnas. En esta sección los órdenes reportados se han encontrado en el mismo tipo de biotopo para cuevas (Reddell, 2005; Palacios-Vargas *et al.*, 2014a).

VI.8. Factores que influyen en la diversidad faunística en ambas cuevas

Las variables analizadas durante este trabajo fueron de dos tipos: factores ambientales, evaluado mediante la temperatura y la humedad relativa de ambas cuevas; y factores biológico, determinado por la población de murciélagos-producción de guano.

En la Cueva de la Mariana se encontró que la temperatura y humedad están correlacionada con la abundancia total registrada, en conjunto con la población de *Tadarida brasiliensis*. Cuando las condiciones climáticas incrementaron y la población de *T. brasiliensis*, la abundancia de las especies incrementa, reflejándose en el aumento de cada una de las poblaciones, específicamente del grupo de los artrópodos.

A contrario de lo obtenido para los murciélagos y la fauna asociada al guano, ya que se encontró una relación inversa y muy baja. Además de utilizar una especie de otro tipo de biotopo como control.

Se tomaron dos ejemplos, siendo las dos especies más abundantes en el guano, el pseudoescorpión *Neallochernes stereus* y el ácaro del género *Acaropsella*. Durante el desarrollo de la investigación se observó que a mayor número de murciélagos, existe una mayor acumulación de guano, y por lo tanto, materia orgánica disponible, sin embargo su uso no es inmediato, y al disminuir a la población de murciélagos, las especies asociadas al guano se ven beneficiadas en el aumento de sus poblaciones. Por lo que la tasa de acumulación de guano es la responsable de la abundancia de estas especies. Por otro lado, la Cueva El Tigre no presentó una correlación positiva con las variables ambientales con la abundancia total de dicha cueva. En cambio, la correlación inversa de la población de *Tadarida brasiliensis* es similar a la de la Cueva de la Mariana, y mayor que esta. Aguilar-Morales y Ruíz-Castillo (1995) analizaron de la misma manera los murciélagos con la fauna asociada al guano, encontrando la misma correlación inversa.

Ambos factores influyen en la diversidad faunística, siendo en la Cueva de la Mariana las variables ambientales beneficiosas para la riqueza y abundancia de especies, y en el caso de la Cueva El Tigre, el guano producido por los murciélagos.

VI.9. Red trófica

Todas las especies que constituyen los diferentes biotopos forman una compleja cadena alimenticia en función del guano incorporado y acumulado por las poblaciones de murciélagos. A pesar que las poblaciones de murciélagos presentan una variación en la distribución dentro de la cueva, su riqueza y abundancia varía espacial y temporalmente, siendo el depósito de guano constante dentro de ambas cuevas.

El origen de la cadena alimenticia dentro del interior de la cueva inicia con el guano después de regresar de alimentarse, el cual es depositado y acumulado directamente, creando un sustrato idóneo para el establecimiento de poblaciones dependientes de dicha fuente como pseudoescorpiones, ácaros, larvas de escarabajos, escarabajos adultos, garrapatas, psocópteros, etc. Estas, a su vez, sustentan a los depredadores que corresponden a arañas, amblopígidios, ciempiés, chinches y otros insectos. De ahí algunos carnívoros como el zorrillo manchado o algunas de las especies de roedores se alimentan de estos organismos. Otros depredadores como víboras de cascabel se encontraron en la salida de la cueva, esperando la hora de salida de los murciélagos para alimentarse de ellos o en el caso de especies como la chinche *Primicimex cavernis* que se encuentra cercana a las poblaciones de *T. brasiliensis* para alimentarse de su sangre.

Como aporte esporádico, algunos vertebrados caen a zonas más profundas de las cuevas y perecen, siendo consumidos por larvas de coleópteros, así como también de murciélagos moribundos o crías que caen accidentalmente.

Por lo que consideramos, al igual que Aguilar-Morales y Ruíz-Castillo (1995) que la remoción o alteración de las poblaciones de murciélagos pueden actuar negativamente sobre el balance natural y conducir a la extinción de por lo menos 70% de la fauna cavernícola de la Cueva de la Mariana y 65% en la Cueva El Tigre; la fauna troglóxena corresponde al resto del porcentaje, respectivamente y no está afectada tan directamente al guano.

VII. CONCLUSIONES

La Cueva de la Mariana es la cueva más extensa y con mayor desarrollo vertical que se ha reportado para Sonora.

El clima interno de la Cueva de la Mariana y Cueva El Tigre tiene un comportamiento típico de cuevas y no de ambiente subterráneo.

La población del murciélago guanero *Tadarida brasiliensis*, la condición climática y las características estructurales de la Cueva El Tigre, la clasifican como una “cueva de calor”, mientras que la Cueva de la Mariana se comporta como “cueva de calor” de manera intermitente, durante el crecimiento de la población de murciélagos en el último mes de la primavera y principio de verano.

Ambas cuevas presentaron las mismas tres zonas físicas: zona de entrada, zona de transición y zona ventilada.

El recurso energético dominante dentro de ambas cuevas es el guano producido por siete poblaciones de quirópteros en la Cueva de la Mariana y cuatro en la Cueva El Tigre, siendo el guano de *Tadarida brasiliensis* la principal fuente de guano para ambas cuevas.

La presencia de guano producto de murciélago insectívoro beneficia a la riqueza y abundancia de especies.

La diversidad faunística de la Cueva de la Mariana difiere de la Cueva El Tigre, a pesar de contener especies similares.

Los biotopos detectados corresponden a guano, estructuras parietales y entrada, siendo este último incorporado a los biotopos que se han registrado para cuevas.

Los factores que influyen en la diversidad faunística fueron la temperatura, humedad relativa y la tasa de acumulación de guano.

La alteración o remoción de las poblaciones de murciélagos dentro de ambas cuevas puede conducir a la extirpación del 80% de las especies registradas en ambas cuevas.

Este es el primer inventario bioespeleológico para el estado de Sonora y para cuevas relacionadas con zonas áridas.

VIII. RECOMENDACIONES

Para el criterio de delimitación de las zonas físicas de la cueva, se recomienda utilizar un mayor número de sensores que se coloquen en toda la extensión de la cueva para comprender los cambios o las zonas estables de las cuevas, además de soportar las condiciones climáticas internas.

No se recomienda la exploración de la Cueva El Tigre durante los meses de julio a octubre, ya que la concentración de guano y la orina de los murciélagos, sobre todo al incremento de la población de *Tadarida brasiliensis* (más de un millón de individuos), produce un alto nivel de amonio causando ardor en los ojos y dificultad para respirar, seguido de la falta de oxígeno en los niveles más profundos.

La Cueva de la Mariana al tener mayor dimensión, se puede explorar durante todo el año, sin embargo durante los meses del verano, se recomienda una buena hidratación durante la expedición.

Desarrolle adecuadamente una salida rápida al exterior en caso de falta de aire, dolor de cabeza, deshidratación, etc.

Se recomienda que a cualquier interesado en la exploración de cuevas en Sonora, se acerque a alguna persona que conozca sobre dichas cuevas. No se debe explorar ninguna cueva por sí solo.

Debido a la presencia de guano (fresco y seco) se instruye el uso de máscaras con filtros que impidan el acceso a las vías respiratorias a las esporas del hongo *Histoplasma capsulatum* causante de la enfermedad de Histoplasmosis.

La presencia de diferentes grupos de vertebrados dentro de las cuevas es constante, por lo que se advierte de los potenciales riesgos que existen durante el manejo de ciertas especies. Se recomienda el uso de equipo adecuado para la manipulación de víboras de cascabel, y el uso de guante y vacuna antirrábica para el manejo de murciélagos.

IX. LITERATURA CITADA

- Aguilar-Morales, S. y A. A. Ruíz-Castillo. 1995. Una comunidad de murciélagos en una “cueva de calor” como factor determinante en el sostenimiento de la diversidad animal cavernícola. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ciencias. Ciudad de México, México.
- Aranda, M. 2000. Huellas y otros rastros de los mamíferos grandes y medianos de México. Instituto de Ecología A. C., Xalapa, México.
- Arita, H. T. 1996. The conservation of roosting bats in Yucatan, México. *Biological Conservation* 74:177-185.
- Arita, H. T. y J. A. Vargas. 1995. Natural history, interspecific association, and incidence of the caves bats of Yucatan, México. *Southwestern Naturalist* 40:29-37.
- Armas, L. F., M. Palacios, R. Novo y T. Iglesias. 1988. Fauna de la cueva La Barca, Península de Guanahacabiles, Pinar del Río, Cuba.
- Armas, L. F. 2006. Los amblipígidos o tenderapos de México. *Boletín Sociedad Entomológica Aragonesa* 39:345-359.
- Armienta, L. R., A. Rodríguez y F. J. Carillo. 2011. Carta geológica-minera y geoquímica Carbó H12-D21 Escala 1:50000. Servicio Geológico Mexicano. México D.F.
- Ávila-Flores, R. y R. A. Medellín. 2004. Ecological, taxonomic and physiological correlates of cave use by Mexican bats. *Journal of Mammalogy* 85:675-687.
- Barr, T. C. 1968. Cave ecology and the evolution of troglobites. *Journal of Evolutionary Biology* 2:35-102.
- Belles, X. 1987. Fauna cavernicole i intersticial de la Peninsula Iberica I les iles Balears. *Consell Superior d'Investigacions Cientifiques*. Madrid, España.
- Biosca, C. 1999. Espeleología. Edimat. España.
- Bole, J., B. Drovenik, N. Mrcic y B. Sket. 1993. Endemic animals in hypogean habitats in Slovenia. *Nase Jame* 35:43-56.
- Borror, D. J. y R. F. White. 1998. A field guide to insects of America North of Mexico. Peterson Field Guides. Boston, New York.
- Briebesca-Contreras, G. y F. A. Solís-Marín. 2014. Las cuevas anquihalinas: laboratorios de la naturaleza. Universidad Nacional Autónoma de México. Coordinación de los Estudios de Posgrado. Ciudad de México, México.
- Caire, W. 1978. The distribution and zoogeography of mammals of Sonora. Mexico. Tesis de doctorado. University of New Mexico, Alburquerque, E.U.A.

- Calva, O. y R. A. Castillo-Gómez. 2014. El medio subterráneo y los seres vivos: la bioespeleología en México y Sonora. *Nuestra Tierra* 22:9-11.
- Calvin-Welbourn. 1999. Invertebrates cave fauna of Kartchner Caverns, Kartchner Caverns, Arizona. *Journal of Cave and Karst Studies* 61:93-101.
- Calvo-Aldea, D., M. T. Molina-Álvarez y J. Salvachúa. 2009. *Ciencias de la Tierra y Medioambientales, 2º Bachillerato*. Editorial McGraw-Hill. España.
- Carabajal, E., J. García-Carrillo y F. Rodríguez. 1996. El medio subterráneo: adaptaciones de los invertebrados terrestres. *Boletín de la Sociedad Entomológica Aragonesa* 15:55-60.
- Castillo-Gómez, R. A., J. P. Gallo-Reynoso, J. Egido-Villarreal y W. Caire. 2010. Los mamíferos. 421-436 pp. En: Molina-Freaner F. E. y Van Devender, T. R. (Eds.), *Diversidad biológica de Sonora*. UNAM, México.
- Ceballos, G. y D. Navarro. 1991. Diversity and conservation of Mexican mammals. 167-198 pp. En: Mares, M. A. y Schmidly, D. J. (Eds.). *Latin American Mammalogy: History, biodiversity and conservation*. University of Oklahoma Press. EUA.
- Ceballos, G. y G. Oliva. 2005. *Los mamíferos silvestres de México*. Fondo de Cultura Económica, CONABIO. UNAM, México, 986 pp.
- Cockrum, E. L. y G. R. Bradshaw. 1963. Notes on mammals from Sonora, Mexico. *American Museum Novitates* 2138:1-10.
- CONAGUA. 2010. *Normales Climatológicas: Sonora*. Servicio Meteorológico Nacional. México.
- Cruz, J. M. 2008. *Murciélagos: entre la noche y la incompreensión*. Universidad Autónoma de México. Ciudad de México, México.
- Culver, D. C. y B. Sket. 2000. Hotspots of subterranean biodiversity in caves and wells. *Journal of Cave and Karst Studies* 62:11-17.
- Culver, D. C. y T. Pipan. 2007. Subterranean ecosystems. En: Levin, S. A. (Ed.). *Encyclopedia of biodiversity*. Elsevier. Netherlands.
- Culver, D. C. Y T. Pipan. 2009. *The biology of caves and another subterranean habitats*. Oxford University Press. New York, Estados Unidos de América.
- Cupul-Magaña, F. G. 2011. Guía para la determinación de las familias de ciempiés (Myriapoda: Chilopoda) de México. *Interciencia* 36:853-859.
- Cupul-Magaña, F. G. 2013. La diversidad de los ciempiés (Chilopoda) de México. *Dugesiana* 20:17-41.
- Damino, M. V. 2012. Murciélagos cavernícolas de la provincia de Córdoba, Argentina. *Mastozoología Neotropical* 19:179-195.
- Deharveng, L. y A. Bedos. 2000. The cave fauna of Southeast Asia: origin, evolution and ecology. 613-642 pp. En: Wilkens, H., Culver, D. C. y Humphreys, W. (Eds.), *Subterranean ecosystems*. Elsevier, London, UK.
- Elbroch, M. 2006. *Animal skulls: a guide to North American species*. Mechanicsburg, PA.

- Espinasa, P. R. 1990. Propuesta de clasificación del karst de la República Mexicana. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería. Ciudad de México, México.
- Espinasa, R. 1994. Origen y distribución de las cavernas de México. CIENCIAS 36:45-49.
- Foelix, R. F. 2011. Biology of spiders. Oxford University Press. New York, EUA.
- Furman, A. y A. Ozgul. 2002. Distribution of cave-dwelling bats and conservation status of underground habitats in the Istanbul area. Ecological Research 17:69-77.
- Galán, C. 1993. Fauna hipogea de Guipúzcoa: su ecología, biogeografía y evolución. Munibe 45:3-163.
- Galán, C. 2004. Fauna cavernícola de la sierra de Aralar: ecología, taxonomía y evolución. Sociedad de Ciencias Aranzadi, 1:1-22.
- Galán, C. 2010. Evolución de la fauna cavernícola: mecanismos y procesos que explican el origen de las especies troglobias. Sociedad de Ciencias Aranzadi 1:1-31.
- Galán, C. y F. F. Herrera. 1998. Fauna cavernícola: ambiente, especiación y evolución. Boletín de la Sociedad Venezolana de Espeleología 32:13-43.
- Galindo, C., A. Sánchez, R. H. Quijano y L. G. Herrera. 2004. Populations dynamics of a resident colony of *Leptonycteris curasoae* (Quiroptera: Phyllostomidae) in central México. Biotropica 36:382-391.
- García, E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). Offset Larios, México.
- Gers, C. 1995. Stratégie alimentaire de Coléoptères troglobites du genre *Aphaneops* (Coleoptera, Trechinae). Mémoires de Biospéologie 22:35-45.
- Gerson, U., A. Fain y R. L. Smiley. 1999. Further observations on the Cheyletidae (Acari) with a key to the genera of Cheyletinae and a list of all know species in family. Entomologie 69:35-86.
- Gnaspini, P. y E. Trajano. 2000. Guano communities in tropical caves. 251-268 pp. En: Wilkens, H., Culver, D. C. y Humphreys W. F. (Eds.). Subterranean ecosystems. Elsevier Press. Amsterdam.
- Grassi, L. 2000. Espeleología. Grijalbo Mondadori. Barcelona, España.
- González-León, C. M. 2010. Evolución geológica y disposición del paisaje actual. 19-49 pp. En: Molina, F. y Van Devender, T. R. (Eds.) Diversidad biológica de Sonora. Universidad Nacional Autónoma de México. México.
- Hawes, R. S. 1939. The flood factor in the ecology of caves. Journal of Animal Ecology 8:1-5.
- Hoffmann, A., J. G. Palacios-Vargas y J. B. Morales-Malacara. 1986. Manual de biospeleología (con nuevas aportaciones de Morelos y Guerrero, México. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México, México.
- Hoffmann, A., M. G. López-Campos y I. M. Vázquez-Rojas. 2004. Los artrópodos de las cavernas de México. 229-326 pp. En: Llorente, J. E., Morrone, J. J., Yañez, O. y Vargas,

- I. (Eds.), Biodiversidad, Taxonomía y Biogeografía de Artrópodos de México: hacia una síntesis de su conocimiento. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ciencias. Ciudad de México, México.
- Holsinger, J. R. y D. C. Culver, 1988. The invertebrate cave fauna of Virginia and a part of eastern Tennessee: Zoogeography and ecology. *Brimleyana* 14:1-162.
- Howarth, F. 1983. Ecology of cave arthropods. *Annual Review of Entomology* 28:365-389.
- Jeannel, R. 1946. Coléptères cavernicoles nouveaux de France avec un étude sur la phylogénie des Speonomus. *Notes Biospéologiques* 1:1-40.
- Jiménez-Valverde, A. y J. Hortal. 2003. Las curvas de acumulación de especies y la necesidad de evaluar la calidad de los inventarios biológicos. *Revista Ibérica de Aracnología* 8:151-161.
- Juberthie, C. y V. Decu. 1994. Encyclopaedia Biospeologica. *Bulletin de Liaison de la Société Internationale de Biospéologie* 22:1-28.
- Kaufman, K. 2005. Guía de campo a las aves de Norteamérica. Houghton Mifflin. New York.
- Kays, R. W. y D. E. Wilson. 2009. *Mammals of North America*. Princeton Field Guides. Princeton University Press. New Jersey, United States.
- Koç, K. 1998. A new record of *Acaropsella volgini* (Acari: Prostigmata, Cheyletidae) for the Fauna of Turkey. *Journal of Zoology* 22:195-197.
- Lazcano, C. 1983. México, paraíso de la espeleología. *Gaceta UNAM* 41:21.
- Lira-Torres, I. Y M. Briones-Salas. 2012. Abundancia relativa y patrones de actividad de los mamíferos de los Chimalapas, Oaxaca, México. *Acta Zoológica Mexicana*, 28:566-585.
- Magurran, A. E. 2004. *Measuring biological diversity*. Blackwell Science Ltd. Oxford, UK.
- Martínez-Hernández, J. 2004. *Manual de espeleología*. Ediciones Desnivel. Madrid, España.
- Master, L. L., S. R. Flack y B. A. Stein. 1998. *Rivers of life: critical watersheds for protecting freshwater biodiversity*. The Nature Conservancy. Arlington, VA.
- Mcfarlane, D., R. C. Keeler y H. Mizutani. 1995. Ammonia volatilization in a Mexican bat cave ecosystem. *Biogeochemistry* 30:1-8.
- Medellín, R., H. T. Arita y O. Sánchez. 2008. *Identificación de los murciélagos de México*. Instituto de Ecología. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México, México.
- Mitchell, H. A. 1964. Investigations of the cave atmosphere of a Mexican bat colony. *Journal of Mammalogy* 45:568-577.
- Mitchell, R. W. y J. R. Reddell. 1971. The invertebrate fauna of Texas caves. 35-90 pp. En: Lundelius, E. L. y Slaughter, B. H. (Eds.), *Natural History of Texas Caves*. Dallas, USA.
- Mitchell, R. W. y J. R. Reddell. 1973. *Studies on the cavernicole fauna of Mexico and adjacent regions*. The Speleo Press. Austin, Texas, USA.

- Molina-Freaner F. E. y T. R. Van Devender. 2010. Diversidad biológica de Sonora. UNAM, México.
- Monroy-Vilchis, O., M. C. Rodríguez-Soto, L. Soria-Díaz y V. Urios. 2011. Fototrampeo de mamíferos de la Sierra Nanchititla, México: abundancia relativa y patrón de actividad. *Revista de Biología Tropical*, 59:373-383.
- Montero-García, I. A. 2000. Las formaciones subterráneas naturales en la historia de México. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Filosofía y Letras. Ciudad de México, México.
- Moore, G. W. y N. Sullivan. 1997. *Speleology: Caves and cave environment*. Cave Books. Missouri, Estados Unidos de América.
- Moreno, C. E. 2001. Métodos para medir la biodiversidad. M&T-Manuales y Tesis SEA. Zaragoza.
- Moulds, T. 2005. Diversity and biogeography of subterranean guano arthropod communities of the Flinders Ranges, South Australia. *Proceeding of the Linnaen Society of New South Wales* 126:125-132.
- Núñez, A., N. Viña, M. Acevedo, J. Mateo, M. Iturralde y A. Graña. 1988. *Cuevas y carsos*. Científico-Técnica. La Habana, Cuba.
- O'Donnell, C. F. J. 2002. Variability in numbers of long-tailed bats (*Chalinolobus tuberculatus*) roosting in Grand Canyon Cave, New Zealand: implications for monitoring populations trends. *New Zealand Journal of Zoology* 29:273-284.
- Palacios-Vargas, J. G. 1993a. Evaluación de la fauna cavernícola terrestre de Yucatán, México. *Mémoires de Biospéologie* 20:157-163.
- Palacios-Vargas, J. G. 1993b. Historia y estado actual de la biospeleología en México. *Boletín de la Sociedad Venezolana de Espeleología* 27:14-17.
- Palacios-Vargas, J. G. 2001. La biodiversidad de los ácaros cavernícolas en México. Escuela Nacional de Ciencias Biológicas. Instituto Politécnico Nacional. México.
- Palacios-Vargas, J. G., C. Juberthie y J. R. Reddell. 2014a. *Encyclopaedia Biospeologica. Mundos Subterráneos*. Ciudad de México, México.
- Palacios-Vargas, J. G., B. E. Mejía-Recamier y A. Oyarzabal. 2014b. *Guía ilustrada para los artrópodos edáficos*. Universidad Nacional Autónoma de Mexico. Mexico.
- Palacios-Vargas, J. G., I. M. Vasquez y J. B. Morales-Malacara. 1985. Aspectos faunísticos y ecológicos de la Gruta de Juxtlahuaca, Gro., México. *Mémoires de Biospéologie* 12:135-142.
- Palmer, A. N. 1991. Origin and morphology of limestone caves. *GSA Bulletin* 103:1-21.
- Palmer, A. N. 2012. *Geología de cuevas*. Unión Internacional de Espeleología. Estados Unidos de América.
- Parson, T. 1968. *Sociología de la religión y la mora*. Editorial Paidós. Buenos Aires, Argentina.

- Parsons, K. N., G. Jones, I. Davidson-Watts y F. Greenaway. 2003. Swarming of bats at underground sites in Britain-implications for conservation. *Biological Conservation* 111:63-70.
- Peck, S. B. 1970. The terrestrial arthropod fauna of Florida caves. *Florida Entomologist* 53:203-207.
- Peck, S. B. y T. L. Finston. 1993. Galapagos Islands troglobites: the questions of tropical troglobites, parapatric distributions with eyed-sister-species, and their origin by parapatric speciation. *Mémoires de Biospéologie* 20:19-37.
- Piña, G., R. A. Castillo-Gámez & C. A. López. 2004. Distribution, habitat association and activity patterns of medium and large sized mammals of Sonora, México. *Natural Areas Journal*, 24:354-357.
- Poulson, T. L. y W. B. White. 1969. The cave environment: limestone caves provide unique natural laboratories for studying biological and geological processes. *Science* 3897:971-980.
- Racovitza, E. G. 1907. Essai sur les problèmes biospéologiques. *Archives Zoologie Expérimentale et générale* 6:371-488.
- Ramírez, J., J. Arroyo, y A. Castro. 2005. Estado actual y relación nomenclatural de los mamíferos terrestres de México. *Acta Zoológica Mexicana*, 21:21-82.
- Reddell, J. R. 1977. A preliminary survey of the caves of the Yucatán Peninsula. *Association for Mexican Cave Studies Bulletin* 6:215-296.
- Reddell, J. R. 1981. A review of the cavernicole fauna of Mexico, Guatemala and Belize. *Texas Memorial Museum Bulletin* 27:1-327.
- Reddell, J. R. 2005. A preliminary bibliography of Mexican cave biology. The Speleo Press. Austin, Texas, USA.
- Reddell, J. R. 2006. Further studies on the cavernicole fauna of Mexico and adjacent regions. The Speleo Press. Austin, Texas, USA.
- Reid, F. 2006. Mammals of North America. Peterson Field Guides. Boston, New York.
- Reinhardt, K. y S. Roth. 2013. Bats and bedbugs: protecting bat caves conserves diverse ecosystems. *Fall* 31:2-4.
- Renault, P. 1971. La formación de las cavernas. Oikos-Tau Ediciones. Barcelona, España.
- Rengifo-Correa, L. y R. González. 2011. Clave ilustrada para la identificación de las familias de Pentatomomorpha (Hemiptera-Heteroptera) de distribución Neotropical. *Boletín Científico Centro de Museo de Historia Natural* 15:(1)168-187.
- Romero, A. 2009. Cave biology: Life in darkness. Cambridge University Press. New York, Estados Unidos de América.
- Rouch, R. 1986. Sur l'écologie des eaux souterraines dans le karst. *Stygologia* 3:345-372.

- Ruíz-Castillo, A. A. 2006. Priorización de cuevas para la conservación de murciélagos cavernícolas de México. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México. Posgrado en Ciencias Biológicas. Facultad de Ciencias. Ciudad de México, México.
- Russell, S. & G. Monson, G. 1998. The birds of Sonora. The University of Arizona Press. Tucson, Arizona, USA, 341 pp.
- Samo, A. J., A. Garmendia-Salvador y J. A. Delgado. 2008. Introducción práctica a la ecología. Pearson PrenticeHall, Madrid, España.
- Schiner, J. R. 1854. Fauna der Adelsberger, Luegger und Magdalenen Grotte. Pp. 231-272. En: A. Schmidl (Ed.). Die Grotten und Höhlen von Adelsberg, Lueg, Planina und Laas. Wien, Austria.
- Servicio Geológico Mexicano. 2012. Carta geológica-minera, Carbó H12-D2, Sonora. Servicio Geológico Mexicano. Pachuca, Hidalgo, México.
- Shannon, C. E. y W. Wiener. 1949. The mathematical theory of communication. University of Illinois Press. Urbana, IL.
- Sibley, D. A. 2003. The Sibley: field guide to birds of Western North America. Alfred A. Knopf, Inc. New York.
- Simmons, N. B. 2005. Order Chiroptera. 312-529 pp. En: Wilson, D. E. y Reeder, D. M. (Eds.), Mammal species of the World: a taxonomic and geographic reference. Johns Hopkins University Press. Baltimore, Maryland, USA.
- Sket, B. 2008. Can we agree on an ecological classification of subterranean animals?. Journal of Natural History 42:1549-1563.
- Soberón, J. y J. Llorente. 1993. The use of species accumulation functions for the prediction of species richness. Conservation Biology 7:480-488.
- Sohn, E. 2016. Extreme Research: cavers, divers and climbers take their science to strange and wonderful places. Nature 529:243-245.
- Stebbins, R. C. 1985. A field guide to Western Reptiles and Amphibians. Peterson Field Guides. Boston, New York.
- Survey and Mapping Working Group. 1999. Basic cave mapping symbols. Uisic.uis-speleo.org. Report Update September 30, 2008. (<http://www.uisic.uis-speleo.org/wgsurmap.html#symbols>).
- Thomas, L. 1983. Antropología de la muerte. Fondo Cultura Económico. Ciudad de México, México.
- Trajano, E. 2000. Protecting caves for the bats or bats for the caves?. Chiroptera Neotropical 1:19-22.
- Trombe, F. 1952. Traité de spéléologie. Payot. Paris, Francia.
- Vandel, A. 1964. Biospéologie: la biologie des animaux cavernicoles. Editions Gauthier-Villars. París, Francia.

- Vandel, A. 1965. Biospeleology: the biology of cavernicolous animals. Pergamon Press. Oxford, United Kingdom.
- Villa, B. y E. L. Cockrum. 1962. Migration in the Guano Bat *Tadarida brasiliensis Mexicana*. Journal of Mammalogy 43:43-64
- Viré, A. 1904. La biospéologie. Comptes Rendus d l'Académie des Sciences, París, Francia.
- White, W. B., D. C. Culver, J. S. Herman, T. C. Kane y J. E. Mylroie. 1995. Karst lands. American Scientist 83:450-459.
- Wilson, E. O. 1992. The diversity of life. Harvard University Press. Cambridge, MA.

X. APÉNDICES

Apéndice 1. Listado taxonómico de la fauna presente en la Cueva de la Mariana (CM) y Cueva El Tigre (CT).

Phylum	Clase	Orden	Familia	Género	Especie	CM	CT	
Arthropoda	Chilopoda	Geophilomorpha	Oryidae	<i>Orphnaeus</i>	<i>O. brevilabiatus</i>	X		
		Scolopendromorpha	Scolopendridae	<i>Scolopendra</i>	<i>Scolopendra sp.</i>	X		
	Arachnida	Pseudoescorpiones	Chernetidae	<i>Neoallochernes</i>	<i>N. steroreus</i>	X	X	
		Amblypygi	Phrynidae	<i>Phrynus</i>	<i>Phrynus sp.</i>	X	X	
		Araneae	Gnaphosidae	<i>Urozelotes</i>	<i>Urozelotes sp.</i>		X	
			Pholcidae	<i>Psilochorus</i>	<i>Psilochorus sp.</i>	X		
				<i>Physocyclus</i>	<i>Physocyclus tanneri</i>		X	
			Sicariidae	<i>Loxosceles</i>	<i>Loxosceles sp.</i>	X	X	
	Acari	Metastigmata	Argasidae	<i>Orthithodoros</i>	<i>Orthithodoros sp.</i>	X		
		Prostigmata	Cheyletidae	<i>Acaropsella</i>	<i>Acaropsella sp.</i>	X		
				<i>Chelachecaropsis</i>	<i>Chelachecaropsis sp.</i>		X	
		Cryptostigmata	Schelorbitidae	<i>Sin determinar</i>		X		
		Astigmata	Acaridae	<i>Sin determinar</i>			X	
	Insecta	Psocoptera	Liposcelidae	<i>Liposcelis</i>	<i>L. bostrychopila</i>	X	X	
			Hemiptera	Cimicidae	<i>Primicimex</i>	<i>P. cavernis</i>	X	
			Reduviidae		<i>Triatoma</i>	<i>T. recurva</i>		X
					<i>Triatoma</i>	<i>Triatoma sp.</i>	X	
					<i>Sin determinar</i>		X	
					<i>Sin determinar</i>		X	
			Neuroptera	Myrmeleontidae	<i>Eremeleon</i>	<i>E. longior</i>	X	
Hymenoptera		Vespidae	<i>Polistes</i>	<i>Polistes sp.</i>	X	X		
Coleoptera			Carabidae	<i>Sin determinar</i>			X	
			Dermestidae	<i>Dermestes</i>	<i>D. maculatus</i>	X	X	
		Tenebrionidae	<i>Eleodes</i>	<i>Eleodes sp.</i>	X			
			<i>Coniontis</i>	<i>Coniontis sp.</i>	X			
Chordata	Amphibia	Anura	Bufoinidae	<i>Anaxyrus</i>	<i>A. punctatus</i>	X		
	Reptilia	Squamata	Viperidae	<i>Crotalus</i>	<i>C. molossus</i>	X	X	
Aves	Columbiformes	Columbidae	<i>Zenaida</i>	<i>Zenaida sp.</i>	X	X		
	Cuculiformes	Cuculidae	<i>Geococcyx</i>	<i>G. californianus</i>	X	X		
	Falconiformes	Cathartidae	<i>Coragyps</i>	<i>C. atratus</i>	X	X		

	Strigiformes	Strigidae	<i>Bubo</i>	<i>B. virginianus</i>	X	
		Tytonidae	<i>Tyto</i>	<i>T. alba</i>		X
Mammalia	Rodentia	Muridae	<i>Neotoma</i>	<i>N. albigula</i>	X	
			<i>Peromyscus</i>	<i>Peromyscus sp.</i>	X	X
			<i>Sigmodon</i>	<i>Sigmodon sp.</i>	X	
			<i>Reithrodontomys</i>	<i>Reithrodontomys sp.</i>	X	
		Heteromyidae	<i>Perognathus</i>	<i>Perognathus sp.</i>	X	
		Sciuridae	<i>Ammospermophilus</i>	<i>A. harrisi</i>	X	
	<i>Spermophilus</i>		<i>S. variegatus</i>	X	X	
	Chiroptera	Molossidae	<i>Tadarida</i>	<i>T. brasiliensis</i>	X	X
		Mormoopidae	<i>Mormoops</i>	<i>M. megalophylla</i>	X	
			<i>Pteronotus</i>	<i>P. davyi</i>	X	X
		Natalidae	<i>Natalus</i>	<i>N. mexicanus</i>	X	X
		Phyllostomidae	<i>Leptonycteris</i>	<i>L. yerbabuena</i>	X	
			<i>Macrotus</i>	<i>M. californicus</i>	X	X
		Vespertilionidae	<i>Myotis</i>	<i>M. velifer</i>	X	
	Carnivora	Canidae	<i>Urocyon</i>	<i>U. cinereoargenteus</i>	X	X
			<i>Lynx</i>	<i>L. rufus</i>	X	
		Felidae	<i>Puma</i>	<i>P. concolor</i>	X	X
<i>Bassariscus</i>			<i>B. astutus</i>	X		
Procyonidae		<i>Nasua</i>	<i>N. narica</i>	X		
		Mephitidae	<i>Conepatus</i>	<i>C. leuconotus</i>		X
<i>Spilogale</i>	<i>S. gracilis</i>		X	X		