



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CONKAL

**Diversidad taxonómica y funcional de la flora
asociada al Calichal a lo largo de un gradiente ambiental
en el norte de la Península de Yucatán, México.**

TITULACIÓN INTEGRAL – TESIS

Que presenta:

Br. Mayte del Rocío Aguilar Canché

Como requisito parcial para obtener el grado de:

Licenciada en Biología

Director de tesis:

Dr. Diego Francisco Angulo Pérez

Conkal, Yucatán, México

Mayo, 2024

Valbo.
Canal
Dr. Diego Francisco Angulo Pérez



TecNM

PORTADA

DIRECCIÓN DEL PROYECTO DE TITULACIÓN

Director (Asesor externo): Dr. Diego Francisco Angulo Pérez

1^{er} Asesor interno: M.C. Carlos Augusto Yam Chim

Revisor: Dr. María Fernanda Ricalde Pérez

CONFORMACIÓN DEL JURADO DEL ACTO PROTOCOLARIO

Presidente: M.C. Carlos Augusto Yam Chim (1^{er} Asesor interno)

Secretario: Dra. Maria Fernanda Ricalde Perez (Revisor)

Vocal: Dr. Diego Francisco Angulo Pérez (Director)

Suplente: M.E.A. Leticia Tellez Sánchez (Academia)

DEDICATORIAS

A Dios, por todas las bendiciones que siempre me ha dado. A mis padres, Jorge y Clary, por darme todo su apoyo, confianza y amor; por mostrarme con su ejemplo la perseverancia y honradez. A mi abuelita María Reyes, que en paz descansa, que siempre procuró que estuviera bien y me trató de la forma más dulce posible. También se la dedico a mi hermano Migue, por aconsejarme siempre y darme su ejemplo de fortaleza y determinación. A mi prometido Miguel, por apoyarme incondicionalmente cuando más lo necesitaba y por ayudarme a no rendirme en este proceso; por animarme a salir adelante y seguir mis sueños. A mi abuelita Justa, que siempre ha estado pendiente de nuestra familia. Se la dedico a mis abuelitos, Miguel y Nicolás, que en paz descansen, ya que siempre me animaron a estudiar y superarme. Por último, quisiera dedicar esta

tesis a mi gran amigo y profesor, que en paz descansa, José Andrés Trejo, que me contagió su pasión y hambre por el conocimiento de la entomología. Sin el cariño, apoyo y comprensión de todos ellos, esto no hubiera sido posible.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Centro de Investigación Científica de Yucatán, por brindarme un espacio donde escribir mi tesis, así como por la beca de la Unidad de Recursos Naturales que me fue otorgada por un tiempo. Les agradezco con mucho cariño a mis asesores, al doctor Rodrigo Duno, que siempre fue amable y atento en lo que necesitara, así como por conseguir recursos para hacer los muestreos, ayudarme a mejorar la redacción de mi tesis y por aconsejarme a tomar las mejores decisiones. Al doctor Diego Angulo, por ser amable, sincero y atento; por siempre tenerme paciencia y compartir su conocimiento conmigo, por ayudarme con el diseño de muestreo, la redacción y estructura de la tesis. Más que asesores, se volvieron mis amigos. También quisiera agradecer al doctor Germán Carnevali, por ayudarnos con las identificaciones de los ejemplares; por ofrecermme ser su ayudante de investigación, ya que así pude darme cuenta de cuánto me gusta estudiar la flora de la Península. Gracias a la doctora Ivón Ramírez, por aconsejarme con amabilidad y por compartir su conocimiento conmigo. Gracias al técnico José Luis Tapia, por su paciencia al explicarme la identificación de algunas especies. A las técnicas del herbario, Silvia Hernández y Lilia Can, por ayudarme a entender lo valioso que son los ejemplares de herbario. De la misma forma agradezco a los técnicos Néstor Raigoza y Matilde Ortiz por ayudarme en lo que necesitara. Por último, agradezco a mis amigos desde la infancia, a Samantha y Toni, por las salidas que ayudan a despejar la mente y por el apoyo emocional que me han dado. A mis amigos del CICY, a Janine, Rommel y Roger, por alivianar los días difíciles con sus bromas y risas en el almuerzo y el cafecito. Cada uno de ellos aportó su granito de arena para la culminación de este proyecto.

RESUMEN (ESPAÑOL E INGLÉS)

Los coquinales ubicados en la selva baja caducifolia con cactáceas candelabroiformes son una de las asociaciones vegetales más amenazadas de la península de Yucatán. Esta situación se debe principalmente al crecimiento urbano, la falta de reconocimiento y la ausencia de protección especial. Por ello, se realizó una primera aproximación a su diversidad taxonómica y funcional, considerando el gradiente ambiental presente en el norte de Yucatán. Para analizar la diversidad taxonómica, se utilizaron transectos que proporcionaron datos sobre la estructura y composición de las especies en cinco sitios. Se calcularon índices de diversidad alfa y se elaboraron curvas de rarefacción para estimar el esfuerzo de muestreo. Además, se utilizó el Índice de Valor de Importancia para determinar la relevancia ecológica relativa de las especies. En cuanto a la diversidad funcional, se examinaron los rasgos funcionales de las hojas para identificar grupos funcionales mediante un análisis de agrupamiento jerárquico y de componentes principales. Se registró un gran número de taxones y especies endémicas de la península, así como siete grupos funcionales. Los resultados mostraron que la hipótesis de una mayor diversidad tanto taxonómica como funcional en las zonas más húmedas se cumplió parcialmente. En el centro se registró la mayor diversidad taxonómica, mientras que en las zonas centro y este se identificaron seis grupos funcionales. Aunque se generó información relevante sobre los coquinales, es necesario profundizar en su estudio.

Palabras clave: selva baja caducifolia, rasgos funcionales, endemismo, ecología, taxonomía, micronichos, gradiente ambiental

The “coquinales” located in the low deciduous forest with candelabriform cacti are one of the most threatened plant associations in the Yucatan peninsula. This situation is mainly due to urban growth, lack of recognition and the absence of special protection. Therefore, a first approach to their taxonomic and functional diversity was made, considering the environmental gradient present in northern Yucatan. To analyze taxonomic diversity, transects were used to provide data on the structure and composition of species in five sites. Alpha diversity indices were calculated and rarefaction curves were developed to estimate sampling effort. In addition, the Importance Value Index was used to determine the relative ecological relevance of species. For functional diversity, leaf functional traits were examined to identify functional groups using hierarchical clustering and principal component analysis. A large number of taxa and species endemic to the peninsula were recorded, as well as seven functional groups. The results showed that the hypothesis of higher taxonomic and functional diversity in the wetter areas was partially fulfilled. The highest taxonomic diversity was recorded in the center, while six functional groups were identified in the center and east. Although relevant information on coquinales was generated, further study is needed.

Key words: low deciduous forest, functional traits, endemism, ecology, taxonomy, microniches, environmental gradient

ÍNDICE DE CONTENIDO

PORTADA.....	2
DIRECCIÓN DEL PROYECTO DE TITULACIÓN	2
CONFORMACIÓN DEL JURADO DEL ACTO PROTOCOLARIO	2
DEDICATORIAS.....	2
AGRADECIMIENTOS.....	4
RESUMEN (ESPAÑOL E INGLÉS).....	5
ÍNDICE DE CONTENIDO	7
ÍNDICE DE TABLAS.....	9
ÍNDICE DE FIGURAS.....	10
ÍNDICE DE ANEXOS.....	11
INTRODUCCIÓN.....	12
OBJETIVOS E HIPÓTESIS	15
OBJETIVO GENERAL.....	15
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
HIPÓTESIS.....	15
FUNDAMENTO TEÓRICO.....	16
LA DIVERSIDAD BIOLÓGICA EN MÉXICO	16
COMPONENTES DE LA DIVERSIDAD: LA DIVERSIDAD TAXONÓMICA, FUNCIONAL Y FILOGENÉTICA	17
<i>Diversidad taxonómica.</i>	18
<i>Diversidad funcional.</i>	19
<i>Diversidad filogenética</i>	21
EL COQUINAL: UNA VEGETACIÓN PARTICULAR AL NORTE DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN	22
GRADIENTE AMBIENTAL OBSERVADO EN EL NORTE DE YUCATÁN	25
MATERIALES Y MÉTODOS.....	27
ÁREA DE ESTUDIO	27
COLECTA DE DATOS	32
<i>Muestreo de vegetación.</i>	32
<i>Rasgos funcionales y diversidad funcional</i>	35
ANÁLISIS DE DATOS.....	37
<i>Diversidad taxonómica.</i>	37
<i>Diversidad funcional.</i>	42
RESULTADOS	45
DIVERSIDAD TAXONÓMICA	45

DIVERSIDAD FUNCIONAL	55
DISCUSIÓN.....	64
DIVERSIDAD TAXONÓMICA	64
DIVERSIDAD FUNCIONAL	72
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	80
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81
ANEXOS	112

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Sitios de estudio con sus características climáticas y ambientales particulares.....	27
Tabla 2 Características climáticas de los sitios de estudio	30
Tabla 3 Rasgos funcionales de las hojas elegidos para evaluar la diversidad funcional.....	43
Tabla 4 Familias más abundantes y géneros con mayor número de especies del coquinal	45
Tabla 5 Especies endémicas de la PBPY encontradas en los muestreos.....	46
Tabla 6 Valores de los índices de diversidad.....	49
Tabla 7 Valores de los índices de diversidad por zonas.....	50
Tabla 8 Las diez especies con los IVIs más altos	52

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sitios seleccionados en el norte de Yucatán, México.....	28
Figura 2. Coquinales seleccionados como sitios de estudio.....	29
Figura 3. Precipitación total anual de los sitios de estudio.....	31
Figura 4. Mapa de temperatura media anual de los sitios de estudio.....	31
Figura 5. Mapa de los climas de los sitios de estudio.	32
Figura 6. Diseño de los transectos.....	33
Figura 7. Referencia visual de la toma de medidas de las plantas.	34
Figura 8. Metodología de muestreo de vegetación y rasgos funcionales.....	35
Figura 9. Especies endémicas de la PBPY.	47
Figura 10. Especies endémicas de la PBPY presentes en el coquinal.....	48
Figura 11. Análisis de rarefacción en los sitios muestreados en el estudio.....	50
Figura 12. Análisis de rarefacción en cada una de las zonas muestreadas en el estudio.	51
Figura 13. Especies más importantes del coquinal según el Índice de Valor de Importancia.....	53
Figura 14. Curva de rango-abundancia con las seis especies más abundantes evaluadas.....	54
Figura 15. Curva de las especies encontradas en la zona oeste con sus respectivas abundancias.	55
Figura 16. Curva de las especies encontradas en la zona centro.	55
Figura 17. Curva de las especies encontradas en la zona este.	55
Figura 18. Agrupamiento jerárquico general de las especies encontradas en los coquinales.	57
Figura 19. Agrupamiento jerárquico de las especies de la zona oeste.	57
Figura 20. Agrupamiento jerárquico de las especies de la zona centro.	58
Figura 21. Agrupamiento jerárquico de la zona este.....	58
Figura 22. Componentes principales de los rasgos funcionales de las especies.....	62

Figura 23. Componentes principales encontrados en la zona oeste.	63
Figura 24. Componentes principales encontrados en la zona centro.	63
Figura 25. Componentes principales de la zona este.	64
Figura 26. Especies representantes de los grupos funcionales.	76
Figura 27. Especies representantes de los grupos funcionales.	79

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Especies registradas en los coquinales	112
---	-----

INTRODUCCIÓN

La biodiversidad es la variedad de plantas, animales y microorganismos que se encuentran en un espacio determinado, abarcando su historia taxonómica, filogenética y funcionalidad dentro del ecosistema (CONABIO, 2022). Tradicionalmente, los estudios se han enfocado en estudiar un solo componente de la biodiversidad; la diversidad taxonómica (Munguía-Rosas et al. 2014), lo cual resulta insuficiente para explicar la complejidad de los patrones ecológicos y evolutivos de las especies en los ecosistemas (Swenson, 2011), dejando de lado, la diversidad funcional, la cual considera los roles de las especies en ecosistemas, así como sus respuestas ante las condiciones ambientales de los mismos (Villéger et al., 2010). El último componente, muchas veces olvidado, es la diversidad filogenética, la cual se relaciona con la distancia filogenética entre especies de una comunidad. Lo cual ayuda a entender la evolución de los linajes, así como su composición y estructura filogenética (Munguía-Rosas et al., 2014; Devictor et al., 2010). Dicho lo anterior, una síntesis de la biodiversidad requerirá la consideración de los tres componentes principales, para comprender los procesos que conforman los patrones de la naturaleza (Swenson, 2011).

Al sureste de México se encuentra la Península de Yucatán, la cual posee una geología kárstica, una hidrografía superficial escasa con sistemas orográficos con elevaciones menores a 350 metros y un gradiente de precipitación que permite la formación de diferentes asociaciones vegetales, descritas por Miranda (1958), Rzedowski (1978), y Flores y Espejel (1994), siendo selvas caducifolias, subcaducifolias y perennifolias las más predominantes (Flores y Espejel, 1994).

En la península de Yucatán es frecuente encontrar suelos someros, compuestos en su mayor parte por una caliza formada por la solución y precipitación de carbonato de calcio que cementa con fragmentos de conchas (Durán y Méndez, 2021).

En el norte de la región, en una angosta franja al sur de los humedales salobres y en forma paralela a la costa se encuentra una coraza continua y superficial, la coquina (antes llamada caliche), una roca fosilífera con macroporos donde se encuentran conchas de moluscos (Espinosa et al., 1998; Estrada-Medina et al., 2013). La meteorización de la coquina es responsable de una de las comunidades vegetales más diversas e interesantes, el coquinal (Duno de Stefano et al., 2024). La coquina provoca una interferencia mecánica en el desarrollo de las raíces y modifica de los movimientos normales del agua en el suelo (Shreve y Mallery, 1933).

La vegetación del coquinal ha sido descrita por Miranda (1958), Flores y Espejel (1994) e incluida dentro de la selva baja caducifolia espinosa, llamada por otros autores como selva baja decidua con cactáceas candelabriiformes (Miranda, 1958). Recientemente Duno de Stefano y colaboradores (2024) describieron la vegetación abierta asociada al coquinal, la cual posee parches de vegetación con árboles aislados (seis metros de altura), arbustos, sufrútices, praderas de hierbas y afloramientos rocosos (Duno de Stefano, 2017). Esta vegetación fue nombrada como coquinal estacionalmente inundado, debido a que, en las temporadas de lluvias, la coquina retiene el agua, produciendo una marcada estacionalidad y selección en las plantas que se desarrollan ahí.

El coquinal, además de ser diverso (206 especies), posee una importante flora endémica de la península de Yucatán: 28 especies endémicas de toda la Provincia Biótica de la Península de Yucatán (PBPY) y dos exclusivas del coquinal (Duno de Stefano, et al., 2024). El endemismo puede ser explicado por presencia de micronichos asociado a la roca aflorada (Carnevali et al.,

2010a). A pesar de tener muchas especies endémicas, el coquinal recién ha empezado a ser estudiado (Duno de Stefano, et al., 2024) y resulta preocupante porque Pérez-Sarabia y colaboradores (2017) mencionan, que los coquinales al norte de Mérida forman parte de los lugares de especial atención en la PBPY, por su baja densidad de colección botánica y/o especial interés biológico, y porque probablemente aún quedan especies por describir. A esto se le suma el exponencial crecimiento urbano (ejemplo: Mérida y Progreso) que ejercen una gran presión sobre las selvas secas, provocando una pérdida importante de los servicios ecosistémicos, trayendo consecuencias adversas para estos frágiles ecosistemas (Barragán y De Andrés, 2015). Otras amenazas para estos ecosistemas son la ganadería y los sistemas tradicionales de milpa (roza, tumba y quema), que pueden interrumpir los procesos de sucesión, disminución de los bancos de semillas y de la biodiversidad en general (Ochoa-Gaona et al., 2007). Además, el coquinal no está bajo ningún tipo de protección especial (Duno de Stefano et al., 2024). Dicho lo anterior, es prioritario estudiar estas comunidades de plantas, incluyendo aquellas endémicas.

El presente estudio generó información relevante y novedosa sobre la diversidad taxonómica y funcional del coquinal estacionalmente inundado a través del gradiente ambiental que presenta el norte de la Península de Yucatán (Orellana et al., 2010).

OBJETIVOS E HIPÓTESIS

Objetivo general

Analizar la diversidad taxonómica y funcional de la flora asociada al coquinal a lo largo del gradiente ambiental en el norte de la península de Yucatán, México.

Objetivos específicos

Identificar la flora y la diversidad taxonómica asociada al coquinal, identificando las especies endémicas que ahí habitan.

Analizar la diversidad funcional de la flora del coquinal a través del reconocimiento de grupos funcionales y sus significados biológicos.

Determinar el patrón de diversidad taxonómica y funcional de los coquinales a través del gradiente ambiental presente en el norte de la península de Yucatán.

HIPÓTESIS

Las áreas de coquinal del oeste de la Península de Yucatán, asociadas a menor precipitación y, por ende, una mayor temperatura presentarán una menor diversidad taxonómica y funcional, mientras que las áreas del este con mayor precipitación y menor temperatura, presentarán una alta diversidad taxonómica y funcional.

FUNDAMENTO TEÓRICO

La diversidad biológica en México

México se destaca por su gran diversidad biológica tanto en animales como en plantas, ya que es considerado un país megadiverso a nivel mundial, junto a Brasil, Colombia, Indonesia y China (Llorente-Bousquets y Ocegueda, 2008), albergando alrededor del 10 % de la biodiversidad mundial (Llorente-Bousquets y Ocegueda, 2008; Luna-Vega et al., 2013; Rivera et al., 2020). Esta alta diversidad biológica es el resultado de una mezcla de factores como su posición geográfica, donde confluyen las zonas biogeográficas Neártica y Neotropical, originando una variedad de climas, vegetación y orografía (Jiménez et al., 2014; Morrone et al., 2017).

La diversidad de la vegetación en el país está estrechamente relacionada con la variedad de climas y según Köppen (1948): tiene desde los más cálidos y húmedos, pasando por secos, templados y húmedos, hasta fríos o polares en algunos puntos altos de las montañas. La variedad de climas es influida por el Océano Pacífico y el Golfo de México y los vientos dominantes (alisios) (Morrone, 2019), así como por la diversa fisiografía que existe en el territorio.

Recientemente se publicó la “World Checklist of Vascular Plants” (WCVP, 2022), bajo la coordinación de los Jardines Botánicos Reales de Kew, que reporta 350,980 especies aceptadas a nivel mundial (Murguía-Romero et al., 2023). En México se encuentran 23,314 - 25,077 plantas vasculares (Villaseñor, 2016; Villaseñor y Meave, 2022) y 23,824 angiospermas (Villaseñor y Meave, 2022), lo que representa el 7 % de la riqueza de plantas a nivel mundial (Rivera et al., 2020; Murguía-Romero et al., 2023).

La flora endémica de México; especies geográficamente restringidas al país (Rzedowski, 1991), también presenta números importantes, alrededor del 50 % de sus especies vasculares son endémicas, solo siendo superado por Sudáfrica (Villaseñor, 2016). Debido a diferentes condiciones como aislamiento ecológico y eventos del pasado geológico (Rzedowski, 1991), se han detectado áreas de endemismo y centros de diversificación. La identificación de áreas de endemismo ha ayudado a determinar zonas prioritarias para la conservación biológica (Luna-Vega y Contreras-Medina, 2010; Kougiumoutzis et al., 2021).

A pesar de que Yucatán tiene dos regiones terrestres prioritarias para la conservación y que el bosque tropical seco es una vegetación con gran extensión en el país (Rzedowski, 1978; Becerra, 2005), solo un pequeño porcentaje de la superficie total de la selva baja caducifolia y de la selva baja caducifolia espinosa (3.4 % y 2.9 % respectivamente) se encuentran incluidos en las regiones terrestres prioritarias y resguardados en Áreas Naturales Protegidas Federales (Arriaga-Cabrera et al., 2009).

Una forma de documentar la amplia biodiversidad de los ecosistemas de México es a través de la sistemática, por medio de la taxonomía y colecciones biológicas. La biodiversidad es parte del patrimonio natural, un recurso estratégico con valor intrínseco, económico, intangible y cultural, por lo tanto, debemos cuidarlo de todas las formas que podamos (Contreras-Ramos, 2014).

Componentes de la diversidad: La diversidad taxonómica, funcional y filogenética

Según Hamilton (2005) la biodiversidad es la variabilidad de seres vivos y los complejos ecológicos de los que forman parte, así como la diversidad entre las especies, comunidades y ecosistemas; por lo tanto, el incremento de la diversidad en los ecosistemas favorece la estabilidad de los mismos (Haahtela, 2019). Por otra parte, CONABIO (2022) la define como la variedad de

plantas, animales y microorganismos que se encuentran en un espacio, abarcando su taxonomía, filogenética y funcionalidad.

La biodiversidad tiene tres componentes esenciales: la diversidad taxonómica, la funcional y la filogenética (Swenson, 2011; Munguía-Rosas et al., 2014). Sin embargo, tradicionalmente el término biodiversidad ha sido usado para referirse a la “diversidad de especies”, es decir, se suele confundir con la diversidad taxonómica, que es solo uno de sus componentes (Hamilton, 2005).

La diversidad taxonómica es el componente más estudiado, sin embargo, suele abarcar comúnmente la riqueza de especies y sus abundancias; lo cual resulta en una información “pobre”, ya que no explica los procesos ecológicos y evolutivos implicados (Swenson, 2011; Munguía-Rosas et al., 2014); es decir, explica relativamente poco sobre la evolución y capacidad de los conjuntos de especies para desempeñar funciones específicas del ecosistema (Suárez-Castro et al., 2022).

El componente filogenético de la biodiversidad es una forma distinta y prometedora de explicar el papel de las interacciones entre especies y sus historias biogeográficas en la estructura y composición de la comunidad (Devictor et al., 2010); mientras que la diversidad funcional, abarca la heterogeneidad morfológica, fisiológica y ecológica de los rasgos dentro de las comunidades, logra explicar mejor el funcionamiento de un ecosistema (Petchey y Gaston, 2006; Devictor et al., 2010) y el papel de cada especie en cada ecosistema (Villéger et al., 2010).

Diversidad taxonómica. La diversidad taxonómica puede ser medida por medio de la diversidad alfa, beta y gamma (Moreno, 2001). La diversidad alfa toma en cuenta la riqueza a una escala local (Devictor et al., 2010, Campo y Duval, 2014), se refiere al número de taxones en una muestra de tamaño estándar (Whittaker, 1972) y la abundancia relativa de los taxones en una

parcela definida o una unidad ecológica (Andermann et al., 2022). Esta diversidad es evaluada por medio de métodos específicos en función de las variables biológicas que miden; riqueza específica, la cual se estima dividiendo el número de especies por el área geográfica (Delang y Li, 2013) y la distribución proporcional del valor de importancia de cada especie (abundancia relativa de los individuos, su biomasa, cobertura, productividad).

La diversidad beta, también llamada rotación espacial, se refiere a la similitud o disimilitud entre muestras o comunidades (Haahtela, 2019) o el cambio biótico a través de gradientes ambientales (Whittaker, 1972), es decir, el grado de diferenciación entre las comunidades de especies (Andermann et al., 2022). La diversidad beta es diferente a la diversidad alfa y gamma, ya que se cuantifica con base en proporciones o diferencias (Whittaker, 1972).

A nivel regional se encuentra la diversidad gamma, la cual describe la diversidad entre comunidades dentro de una gran área geográfica y resulta de las diversidades alfa como de las diversidades beta (Moreno, 2001). A menudo es representada como unidades biogeográficas como ecorregiones (Andermann et al., 2022), por medio de las sumas individuales de las distribuciones de las especies en el área previamente determinada (Andermann et al., 2022).

Diversidad funcional. Para evaluar la diversidad es necesario considerar los roles de cada especie en los ecosistemas o la manera en que responden a las condiciones ambientales que se les presentan (Villéger et al., 2010), ahí radica la importancia de la diversidad funcional. La diversidad funcional es un componente muy importante de la biodiversidad, sin embargo, los métodos para cuantificarla no estaban tan desarrollados, sin embargo, en los últimos años se han desarrollado métodos más exactos y confiables para estimarla (Mouchet et al., 2010; Mammola et al., 2021). Es definida como las diferencias funcionales entre las especies de una comunidad (Petchey y Gaston,

2002), puede ayudar a simplificar comunidades complejas y de esta forma poder comprender mejor los procesos ecológicos que están implícitos (Reyes-García et al., 2022).

La diversidad funcional está basada en rasgos funcionales, los cuales son atributos biológicos que influyen en el desempeño de los organismos (Villéger et al., 2010). De la misma forma, son potentes indicadores de la capacidad de un individuo para dispersarse, establecerse y sobrevivir en un lugar determinado a través del desarrollo de estrategias ecológicas (Zirbel y Brudvig, 2020; Zhang et al., 2022). Otra definición es la dada por Lavorel y Garnier (2002), quienes definen los rasgos funcionales como aspectos de los fenotipos a escala individual que existen a lo largo de respuestas y efectos continuos. Esto se basa en el concepto del tipo vegetal, el cual propone que las especies se pueden agrupar de acuerdo a las respuestas al medio y los efectos en los procesos del ecosistema. Los rasgos de respuesta de las plantas a factores ambientales pueden ser a recursos o perturbaciones y los rasgos de efectos sobre las funciones en el ecosistema pueden ser el ciclo bioquímico o la susceptibilidad a las perturbaciones (Lavorel y Garnier, 2002).

Los rasgos de respuesta son componentes fenotípicos que responden al medio ambiente influyendo en la aptitud física y el rendimiento del organismo, mientras que los rasgos de efecto influyen en la aptitud física y/o el rendimiento del organismo de un interlocutor y/o tienen un efecto sobre el medio ambiente (Weiss y Ray, 2019). Los rasgos proporcionan información útil acerca de la eficacia biológica de los organismos, de los mecanismos de ensamblaje de la comunidad y sus respuestas a cambios en el ambiente (rasgos/respuesta) y de la influencia de la comunidad sobre los procesos ecosistémicos (Rodríguez-Alarcón et al., 2020). De esta forma, permiten entender las estrategias evolutivas (caracteres fijados por procesos evolutivos) y/o ecológicas (caracteres respondiendo al ambiente) que las especies han desarrollado a través de su historia y sus

interacciones (Liao et al., 2021), es decir permiten vincular la variación fenotípica con los procesos ecológicos implicados (Weiss y Ray, 2019).

La elección de los rasgos funcionales debe ser consistente con las condiciones ambientales del lugar (Perea et al., 2021), con el propósito del estudio (Weiss y Ray, 2019; Aguilar-Canché et al., 2022) así como la disponibilidad técnica y económica.

Existen rasgos funcionales asociadas a toda la planta (forma de crecimiento, altura, flamabilidad, clonabilidad y espinescencia) rasgos de las hojas (área específica, contenido de materia seca y grosor), rasgos del tallo (conductividad del xilema, grosor de la corteza y contenido de materia seca de las ramas), rasgos subterráneos (longitud de raíz específica, morfología del sistema radicular y estrategia de absorción de nutrientes), y rasgos regenerativos (masa de la semilla, síndrome de dispersión y potencial de dispersión) (Perez-Harguindeguy et al., 2013).

El campo de la diversidad funcional se encuentra en un rápido crecimiento y ha sido aplicado a diversos temas de la teoría ecológica como: la influencia de la biodiversidad en el funcionamiento de los ecosistemas, las facetas de la biodiversidad que influyen en los procesos ecosistémicos y su relación con las condiciones ambientales, así como las reglas de ensamblaje en las comunidades y su relación con la diversidad funcional, de ahí la importancia de estudiarla (Córdova-Tapia y Zambrano, 2015).

Diversidad filogenética. La diversidad filogenética se refiere a la distancia filogenética total entre especies en una comunidad, la cual es influenciada por la relación y abundancia entre las mismas (Srivastava et al., 2012; Munguía-Rosas et al., 2014). También es definida como una medida de biodiversidad basada en las relaciones evolutivas entre especies (Winter et al., 2013, Munguía-Rosas et al., 2014; Rivera-Martínez, 2020). Puede ser relacionada con el funcionamiento

del ecosistema por los servicios ecosistémicos y procesos contundentes como el de extinción, ya que puede ayudar a predecir extinciones en cascada, así como invasiones bióticas (Srivastava et al., 2012; Winter et al., 2013). De esta manera, la diversidad filogenética se convierte en una vía prometedora para explicar el papel de las interacciones entre especies y las historias biogeográficas en la estructura y composición de las comunidades (Devictor et al., 2010).

Se ha encontrado que las especies relacionadas frecuentemente tienen rasgos funcionales, nichos, e interacciones ecológicas similares, sugiriendo que la diversidad filogenética puede encapsular muchos de los aspectos de la funcionalidad de la biodiversidad (Srivastava et al., 2012). Por lo tanto, es necesario generar estrategias efectivas para la conservación de la biodiversidad, incluyendo especies, funciones y linajes individuales en áreas protegidas (Devictor et al., 2010), si se pierden especies, inevitablemente se pierde información evolutiva (Winter et al., 2013).

El Coquinal: una vegetación particular al norte de la Península de Yucatán

Al norte de la Península de Yucatán se encuentra la selva baja caducifolia con cactáceas candelabrifórmes, la cual se encuentra ubicada en una angosta franja que bordea el sur de los humedales de forma paralela a la costa (Miranda, 1958, Durán y Méndez, 2021). Diversos autores han usado diferentes nombres para referirse a esta vegetación, tales como selva baja caducifolia espinosa o selva baja decidua con cactáceas candelabrifórmes (Miranda, 1958; Flores y Espejel, 1994, Durán y Méndez, 2021); sin embargo, dentro de la selva baja caducifolia con cactáceas candelabrifórmes se encuentra una vegetación particular, la cual botánicos locales la conocían como “calichal” (Duno de Stefano, 2017; Aguilar-Canché et al., 2022), que presenta diferencias con la selva baja caducifolia del resto de Yucatán, por ser más xerófila y por su suelo en particular, la coquina (Duno de Stefano et al. 2024) (antes llamada “caliche”).

Duno de Stefano y colaboradores (2024) han realizado un estudio preliminar de la vegetación, proponiendo el nombre de coquinal estacionalmente inundado. Esta vegetación es un ensamble tipo mosaico de áreas abiertas continuas, estacionalmente inundadas, dominadas principalmente por hierbas, con parches de vegetación leñosa (árboles pequeños, arbustos, incluyendo plantas suculentas) (Duno de Stefano et al., 2024). Se clasificó como una subasociación de la selva tropical seca con cactáceas asentadas en el sustrato, en el que destaca el predominio de la coquina. La coquina puede ser definida como una roca fosilífera con macroporos donde se encuentran conchas de moluscos bivalvos o gasterópodos (Espinosa et al., 1998; Estrada-Medina et al., 2013, Shen et al., 2013; Estrada-Medina et al., 2019), resultado de un proceso geofísico entre la interacción de roca caliza meteorizada, agua dulce subterránea y agua de mar (Duno de Stefano, 2017). Las rocas presentan grietas superficiales y cavidades de diferentes tamaños, junto con ligeras depresiones y elevaciones que posiblemente determinan la dinámica de la vegetación en la zona, ya que podrían ser vías importantes para que el agua, los nutrientes y raíces se desplacen más profundo (Estrada-Medina et al., 2013).

El coquinal estacionalmente inundado es caracterizado por una zona abierta con afloramientos rocosos que durante la temporada de lluvias se encuentra inundada, con una profundidad de aproximadamente 10 a 50 cm, donde prosperan ciperáceas, poáceas y otras especies hidrofílicas (Duno de Stefano et al., 2024). Otras condiciones que restringen las comunidades vegetales de la zona son la profundidad del suelo, disponibilidad de nutrientes, el déficit hídrico en temporadas de sequía, la porosidad de la coquina y el volumen de los fragmentos rocosos (Estrada-Medina et al., 2019); permitiendo que se desarrollen especies consideradas endémicas del coquinal: *Zephyranthes orellanae* Carnevali, Duno & J.L. Tapia e *Ipomoea sororia* D.F. Austin & J.L. Tapia (Duno de Stefano, et al., 2024).

El otro elemento estructural importante del coquinal son los parches o “islas” de árboles y arbustos, con un microrelieve que permite que sobresalgan ligeramente, por lo que no se inundan y muchas veces funcionan como plantas nodrizas de cactus (Duno de Stefano et al., 2024).

Por otro lado, en la región se distinguen tres temporadas climáticas; la sequía, lluvias en verano y lluvias en invierno ocasionadas por “nortes”. En la temporada de sequía (marzo-mayo) hay un promedio de 30 mm de lluvias, con una máxima temperatura de 37.5 °C; en la temporada de lluvias de verano (junio-octubre) se alcanzan precipitaciones de 141.2 mm y en invierno 63 mm, con temperaturas máximas de 24.6°C (SMN-CONAGUA, 2022). Tales condiciones ponen altas restricciones a las especies, funcionando como un filtro ambiental que determina que solo las plantas que han logrado adaptarse a largos períodos de sequía y cortos períodos de lluvias, prosperen (Aguilar-Canché et al., 2022).

Existe una heterogeneidad a nivel de local (microambiente), debido al microrelieve más alto o bajo, que crea distintos micronichos, que incrementan la diversidad de plantas (Carnevali et al., 2010a), lo que explicaría la persistencia, adaptación y diversificación de especies endémicas (Zuloaga et al., 2019). El endemismo es alto en los coquinales, se han registrado 28 especies endémicas como: *Angelonia parviflora* Barringer (Plantaginaceae), *Cuphea gaumeri* Koehne (Lythraceae), *Jatropha gaumeri* Greenm. (Euphorbiaceae), *Mammillaria heyderi* subsp. *gaumeri* (Britton & Rose) D.R. Hunt (Cactaceae) y *Zephyranthes orellanae* Carnevali, R. Duno & Tapia-Muñoz (Amaryllidaceae) (Duno de Stefano et al., 2024).

A pesar de tener muchas especies endémicas, el coquinal no ha sido muy estudiado, lo cual resulta preocupante, considerando que las especies con distribución restringida tienen mayores probabilidades de extinguirse (Gastón, 1994; Luna-Vega et al., 2006). Paralelamente, hay que

tomar en cuenta que los coquinales al norte de Mérida forman parte de los lugares de especial atención en la Provincia Biótica de la Península de Yucatán, por su baja densidad de colección botánica y/o especial interés biológico (Pérez-Sarabia et al., 2017). Se necesitan proteger, ya que las presiones humanas (ejem. pérdida y degradación del hábitat, fragmentación y contaminación) se han acelerado drásticamente en los últimos tiempos, poniendo en riesgo la biodiversidad (Correa et al., 2020), de tal forma que podríamos perder especies sin haberlas conocido y estudiado antes.

Gradiente ambiental observado en el norte de Yucatán

El entendimiento del clima peninsular ayuda a entender los patrones de la flora y fauna que presentan. Varios estudios han encontrado que existe un gradiente de precipitación al norte de Yucatán, el cual ocasiona que la parte norte sea la más seca, aumentando la humedad hacia el sureste de la península (hacia el noroeste ≤ 800 mm; hacia el sureste ≥ 1400 mm). Respecto a la temperatura, se encuentra otro gradiente con las temperaturas más altas hacia el suroeste y las más bajas en el noreste (Orellana et al., 2010). Por lo tanto, hacia el oeste es más caluroso y menos húmedo y hacia el este, lo contrario, lo cual podría afectar la diversidad de los coquinales.

Los factores que determinan las precipitaciones y climas de Yucatán, son principalmente la Zona de Convergencia Intertropical (ZCI), y las anomalías o cambios en la temperatura de la superficie del mar, cambios en la presión atmosférica, así como en la latitud y elevación (Torrescano-Valle y Folan, 2015). Es bien sabido que la ZCI determina los patrones de precipitación en toda la Península de Yucatán y en todo el Caribe (Moura y Vitorino, 2012). Cuando la ZCI migra hacia el norte durante junio y octubre deja precipitaciones en toda la región y cuando migra hacia el sur en noviembre-mayo determina la estación seca (Marshall et al., 2014; Torrescano-Valle y Folan, 2015). Otros factores que influyen en el clima peninsular son el

Anticiclón Bermuda Azores del Atlántico, que genera una gran actividad atmosférica, la presencia de “nortes” desde otoño, así como de los vientos del este (alisios), la presencia de la canícula o sequía intraestival, influencia de perturbaciones tropicales y por último, de la corriente cálida del canal de Yucatán, que da lugar a la corriente del Golfo (Orellana et al., 2003).

La temperatura de Yucatán está distribuida en dos zonas; la cálida y la muy cálida. La primera, delimitada por la isoterma de 26° C, (24 a 26° C) y la segunda con temperaturas mayores a 26°C (Orellana et al., 2003, 2010). En el caso de la precipitación, en el noroeste llueve 500 mm o menos de forma anual, por el noreste entre 600-800 mm, y por el sureste de Yucatán se encuentran lluvias más abundantes con 1200-1500 mm (Orellana et al., 2003, 2010).

Todos los fenómenos mencionados propician la existencia de varios climas en Yucatán (Orellana et al., 2010). De acuerdo con la clasificación climática de Köppen modificada por García (2004), en Yucatán existen ocho unidades bioclimáticas, por ejemplo, los climas Aw, que hacen referencia a climas calientes subhúmedos con lluvias en verano y climas BS, climas secos o áridos (García, 2004). El BS0(h') w(x'), el más seco de los semiáridos, cálido con lluvias en verano y sequía intraestival. El BS1(h') w, el menos seco de los semiáridos, cálido con lluvias en verano y sequía intraestival. El Aw0, un clima cálido, el más seco de los subhúmedos y la variante más seca de los climas subhúmedos Aw0(x'), con lluvias en verano y alto porcentaje de lluvias invernales (Orellana et al., 2014).

El conocimiento de los climas es imprescindible para entender los procesos naturales, ya que las condiciones atmosféricas moldean a su vez otros procesos que ayudan a conformar el paisaje (Orellana et al., 2014); por lo tanto, el clima actual como el pasado, podrían influir en la variación espacial de la riqueza de especies, especialmente en las endémicas (Zuloaga et al., 2019).

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Se escogieron cinco áreas ubicadas al norte de la Península de Yucatán, las cuales fueron previamente exploradas y seleccionadas de acuerdo a criterios específicos. El criterio decisivo fue la presencia de coquina, es decir; la presencia continua de coraza con conchas fosilizadas (lo que comúnmente se llama laja); así mismo, se consideró que las áreas fueran lo más conservadas posible, y mayores a una hectárea. Las cinco áreas seleccionadas de Oeste a Este, fueron fueron: Kinchil, Sisal, Telchac, Corchito y Río Lagartos. (Tabla 1, Figura 1 y 2)

Tabla 1

Sitios de estudio con sus características climáticas y ambientales particulares

Sitios	Longitud (x)	Latitud (y)	Clima	Lluvias	Temperatura
Kinchil	90°11'30.1"W	20°51'14.2"N	BS1(h') w	800-1000	26-28 °C
Sisal	89°58'59.6"W	21°05'26.3"N	BS1(h') w(x')	600-800	24-26° C
Corchito	89°36'43.7"W	21°15'21.5"N	BS0(h') w(x')	500-600	24-26° C
Telchac	89°24'55.0"W	21°17'59.8"N	BS0(h') w(x')	500-600	24-26° C
Río Lag.	88°09'51.5"W	21°34'18.2"N	BS1(h') w(x')	600-800	24-26° C

Notas. Elaboración propia con información de García (1998, 2004), Orellana et al. (2010), Hernández et al. (2018). Lluvias en mm.

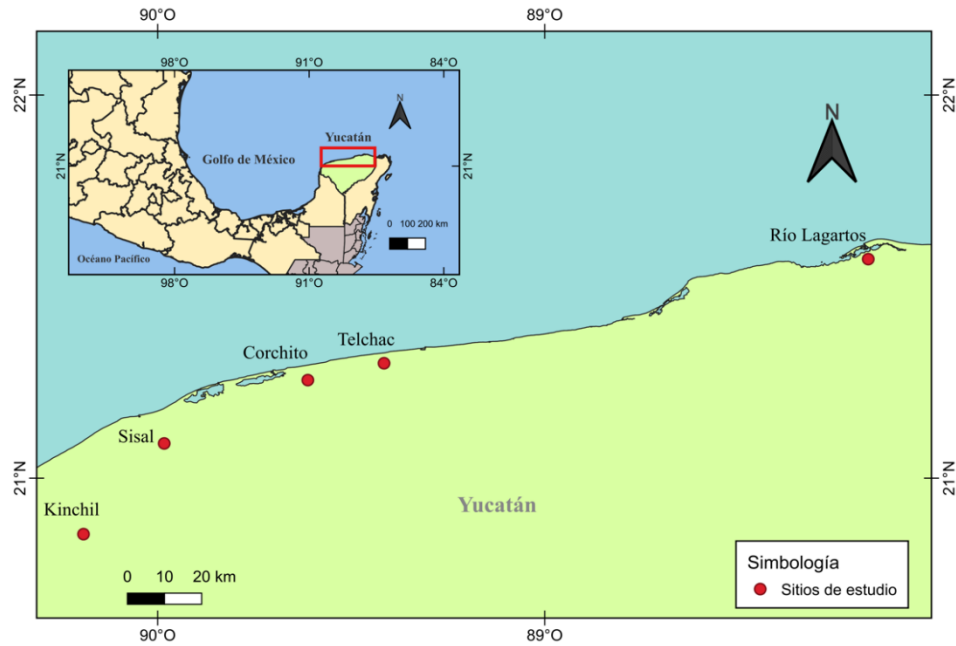


Figura 1. Sitios seleccionados en el norte de Yucatán, México.

Notas. Elaboración propia con información de CONABIO-INEGI (2022) con el programa QGIS versión 10.

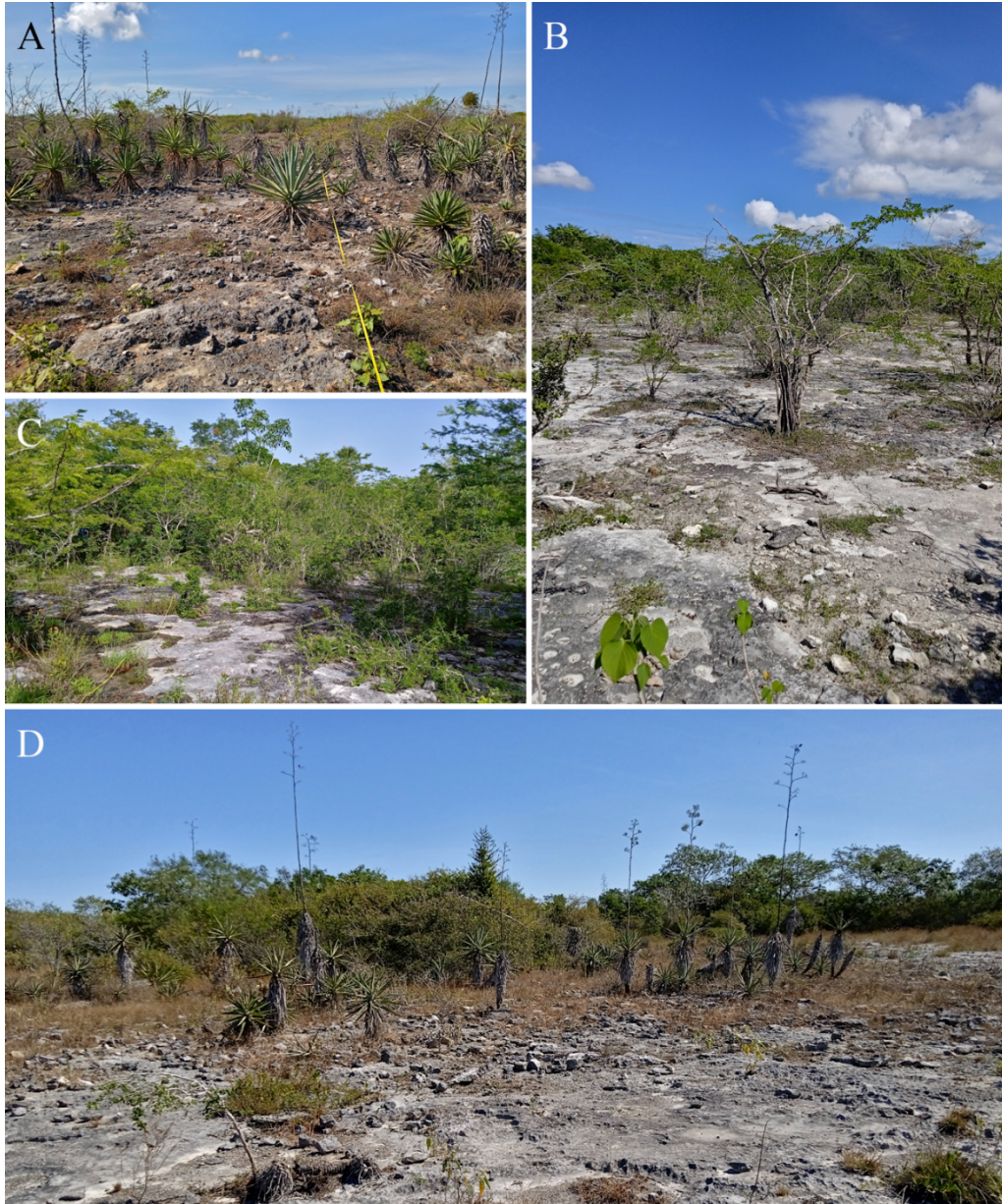


Figura 2. Coquinales seleccionados como sitios de estudio.

Notas. **A.** Paisaje de Telchac, dominado por *Agave angustifolia* Haw. var. *angustifolia* (Agavaceae). **B.** Paisaje de Sisal, con arbusto de *Tara vesicaria* (L.) Molinari, Sánchez Och. & Mayta (Fabaceae). **C.** Paisaje de Celestún con *Asclepias curassavica* L. (Apocynaceae) y *Vachellia collinsii* (Saff.) Seigler & Ebinger (Fabaceae). **D.** Paisaje de Telchac con la coquina expuesta. Fotografías: Mayte Aguilar

El clima predominante en Yucatán es AWo (clasificación de Köppen modificada por García (2004), un clima caliente subhúmedo con lluvias en verano. Sin embargo, los coquinales estudiados tienen un clima tipo BS, es decir, climas secos o áridos (Tabla 2).

Tabla 2

Características climáticas de los sitios de estudio

Sitios	Clima	Características
Kinchil	BS1(h') w	Semiseco muy cálido con regímenes de lluvia de verano y sequía intraestival (canícula) (Más húmedo de los climas BS).
Sisal y Río Lagartos	BS1(h') w(x')	Semiárido muy cálido con regímenes de lluvias de verano y con un porcentaje de precipitación invernal.
Corchito y Telchac	BS0(h') w(x')	Seco muy cálido, con regímenes de lluvias de verano con un porcentaje de precipitación invernal y sequía intraestival (canícula). Lluvias escasas todo el año en comparación con otros climas (más seco de los BS).

Notas. Elaboración propia con información de García (1998, 2004), Orellana et al. (2010), Hernández et al. (2018).

Las variables abióticas tomadas en cuenta para el estudio fueron: precipitación, temperaturas medias anuales, así como las unidades bioclimáticas presentes en los coquinales seleccionados. A continuación, se presentan los mapas correspondientes: precipitación (Figura 3), temperatura (Figura 4) y unidades bioclimáticas de los sitios de estudio (Figura 5).

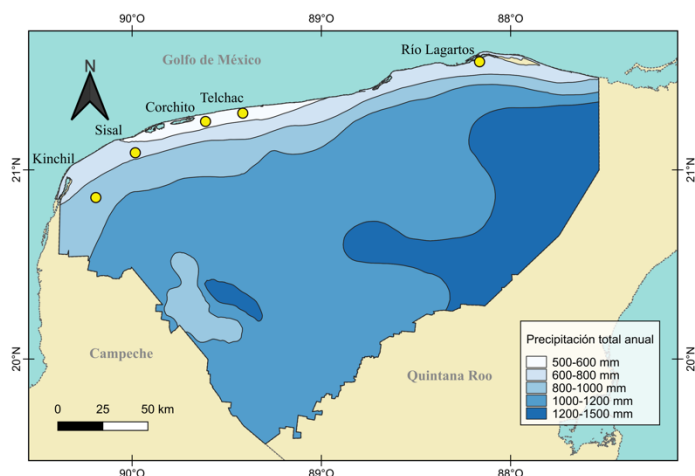


Figura 3. Precipitación total anual de los sitios de estudio.

Notas. Elaboración propia basada en información de García y CONABIO (1998a) con el programa QGIS.10.

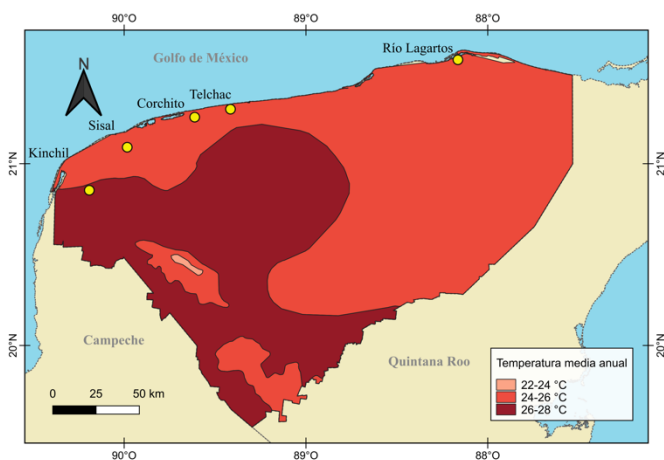


Figura 4. Mapa de temperatura media anual de los sitios de estudio.

Notas. Elaboración propia basada en la información de García y CONABIO (1998b) con el programa QGIS.10.

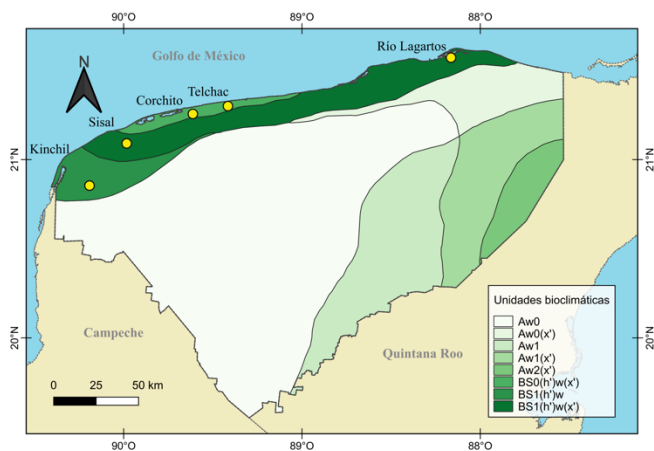


Figura 5. Mapa de los climas de los sitios de estudio.

Notas. Elaboración propia con información de INEGI (2008) con el programa QGIS.10.

Colecta de datos

Muestreo de vegetación. Los levantamientos de vegetación se realizaron entre los meses de marzo y junio del 2022 mediante una modificación del método de Canfield (1941), que consistió en establecer dos transectos de 50 metros de longitud separados entre sí por una distancia mínima de 50 metros. Los transectos fueron orientados de norte a sur con ayuda de una brújula. En cada transecto se realizaron seis subtransectos de 20 m² (2 x 10 m), es decir, se registraron 240 m² en total por los dos transectos de cada sitio, basándose en la metodología de Parra-Tabla y colaboradores (2018) y Munguía-Rosas y colaboradores (2019) (Figura 6).

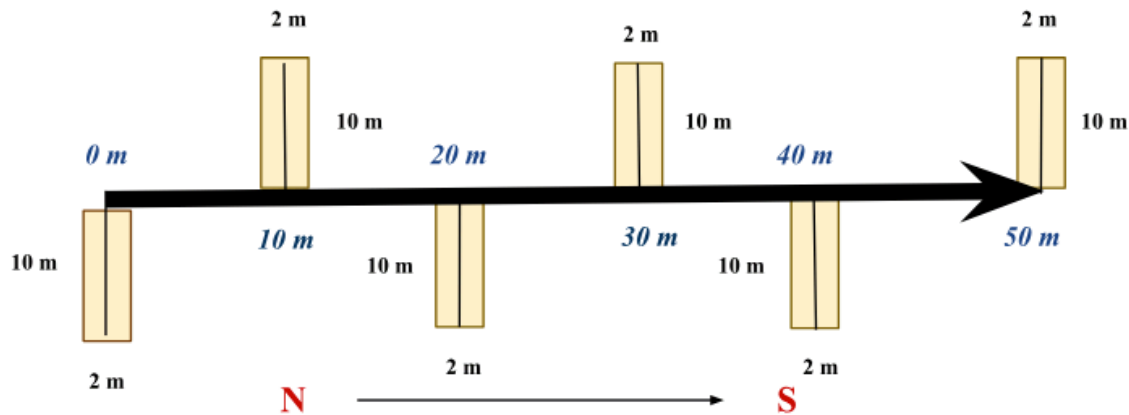


Figura 6. Diseño de los transectos.

Notas. Transectos de 50 metros basados en la metodología de Parra-Tabla et al. (2018) y Munguía-Rosas et al. (2019), orientados de norte a sur.

El criterio para incluir una planta en el muestreo era que su tallo principal o la mayoría de él se encontrara dentro del subtransecto, exceptuando plántulas. En cada subtransecto se registraron las especies presentes y se obtuvieron datos sobre la estructura y composición de la vegetación, tales como riqueza de especies, abundancias y coberturas (Figura 7). Para la realización de los transectos se usaron cintas métricas de 50 metros, flexómetros de 3 y 5 metros y cuerdas plásticas de 10 metros.

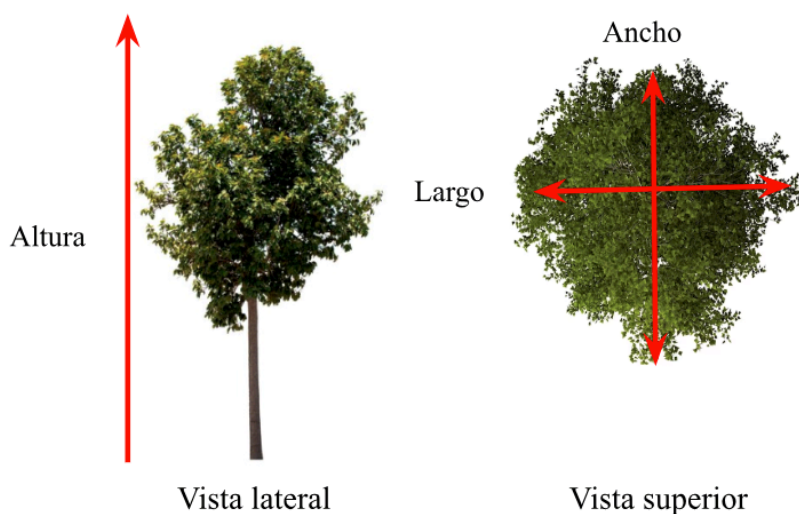


Figura 7. Referencia visual de la toma de medidas de las plantas.

Notas. Imagen base tomada de internet y modificada.

Adicionalmente, se colectaron individuos que presentaran rasgos reproductivos (flores y/o, frutos) los cuales fueron prensados *in situ* con la ayuda de una prensa botánica. En una libreta de campo fueron anotados los datos de identificación de cada ejemplar, el número de etiqueta que se le asigna, la familia botánica, características del lugar donde se colectó, hábito, color de flores o frutos, fecha, colector, duplicados, entre otros (Figura 8). Posteriormente fueron colocados en una secadora botánica durante dos o tres días a 60° C. La identificación de los ejemplares se basó en la consulta con taxónomos especialistas, además de la comparación de las plantas con los ejemplares depositados en el herbario CICY, y en casos más complicados, con el uso de guías de identificación taxonómica. Finalmente, confirmada la identidad taxonómica, se colocaban las etiquetas y se entregaban al herbario CICY para su montaje y envío de los duplicados a otros herbarios como GH, UADY, MEXU, MO, SEL, XAL (acrónimos de acuerdo con Thiers, 2023 [actualizado continuamente]).

Rasgos funcionales y diversidad funcional. Con la finalidad de registrar la diversidad funcional se midieron rasgos funcionales de hoja como largo, ancho, grosor, área foliar, peso fresco y peso seco; y fueron medidos según la metodología de Cornelissen y colaboradores (2003) (Figura 8).



Figura 8. Metodología de muestreo de vegetación y rasgos funcionales.

Notas. **A.** Toma de fotografías del paisaje del coquinal en Río Lagartos. **B.** Transecto para muestrear la diversidad taxonómica en Río Lagartos y toma de datos relevantes del sitio. **C.** Hojas colectadas para la medición de sus atributos. **D.** Medición de atributos de las hojas con un vernier digital. Fotografías: A. Rodrigo Duno. B-D. Mayte Aguilar.

Se seleccionaron rasgos de las hojas, debido a que están asociados directamente con la adquisición de recursos, resistencia mecánica y al daño. El tamaño de las hojas determina la capacidad de capturar recursos de luz, carbono y se ve afectado por las condiciones ambientales, como temperatura, precipitación y tiende a ser menor en condiciones estresantes (Su et al., 2021). El largo y ancho fueron medidos, ya que en el tamaño de las hojas se reflejan las condiciones del ambiente, reducir el área foliar implica una menor exposición a la radiación solar, y menor pérdida de agua por evapotranspiración, el grosor de la hoja refleja diferencias en la acumulación de agua y/o sales, el peso fresco se asocia con la cantidad de agua presente y el seco en la cantidad de tejido presente en las hojas.

Hojas sanas, sin daño por herbivoría fueron seleccionadas. En especies que presentaron hojas compuestas, las mediciones se realizaron seleccionando folíolos apicales, siguiendo la metodología de Gomes, y colaboradores (2021), Gorné y colaboradores (2022) y Arellano-Rivas y colaboradores (2018). Las hojas eran colectadas, etiquetadas y puestas en refrigeración en campo. En caso que las hojas no pudieran procesarse el mismo día de su colecta, se almacenaban a -20°C hasta aproximadamente media hora antes de ser procesadas. Para medir el largo, ancho y grosor se utilizó un vernier digital marca ExGizmo. El largo es considerado como la parte media de la hoja en un plano vertical, el ancho como la parte media en un plano horizontal; y el grosor como el espesor de la hoja evitando la venación central (Munguía-Rosas et al., 2019).

El área foliar específica fue medida con el medidor de área foliar LI-3100C que permite escanear cada una de las láminas extendidas con resultados en cm^2 . En algunos casos fue imposible obtener hojas sanas, por el alto grado de herbivoría o cuando una hoja era muy gruesa, y era necesario realizar una calca de la hoja en papel, posteriormente recortada y el recorte usado para

estimar el área foliar. Las hojas frescas fueron pesadas en el laboratorio lo más pronto posible desde que fueron colectadas y cuando esto no fue posible y fueron congeladas, se procedió a descongelarlas y secarlas completamente antes de ser pesadas. Una vez realizado el pesado de las hojas frescas, fueron depositadas en bolsas de papel estraza y almacenadas en la secadora botánica hasta secarse (dos a tres días aproximadamente) y posteriormente el peso seco fue estimado. Tanto el peso fresco como el seco fueron medidos con una balanza analítica de laboratorio marca Ohaus.

Análisis de datos

Diversidad taxonómica. Con el propósito de medir la diversidad se calculó la riqueza específica, una de las métricas taxonómicas más usada para medir la biodiversidad, ya que se basa en el número total de especies (Moreno, 2001) y se ha usado de forma tradicional como indicadora en las evaluaciones de biodiversidad (Oliveira et al., 2022). La forma ideal de medir la riqueza es contar con un inventario completo del número total de especies, obtenido por medio de un censo (Moreno, 2001) o por medio de índices de riqueza específica. En este caso, la riqueza fue calculada para cada sitio y por zonas, con el programa Past 4 (<https://past.en.lo4d.com/windows>), con los datos registrados en los transectos. De igual forma se registraron las familias y géneros más abundantes. También se registraron las especies endémicas de la Provincia Biótica de Yucatán con su respectiva categoría según la IUCN (The International Union for Conservation of Nature) y la NOM-059.

Para complementar la riqueza específica se calculó el índice de Shannon-Wiener, usado para estimar la diversidad alfa (la diversidad beta y gamma no fueron calculadas, ya que no se encuentran en los objetivos de este estudio). El índice de Shannon-Wiener representa el grado de incertidumbre asociada a la selección aleatoria de un individuo en una comunidad, es decir, refleja

la heterogeneidad de una comunidad sobre la base de dos factores: el número de especies presentes y su abundancia relativa (Moreno, 2001; Pla, 2006). Sin embargo, esta métrica requiere que todas las especies se encuentren representadas en la muestra y es sensible a la abundancia (Soler et al., 2012). Su valor va del cero (cuando solo hay una especie) al $\ln(s)$ (logaritmo natural de la riqueza específica con máxima equitatividad), por lo tanto, su valor tiende a cero en comunidades poco diversas y a tres en comunidades más diversas (Soler et al., 2012). Se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$H' = -\sum \rho_i \ln \rho_i \text{ (Moreno, 2001)}$$

Donde ρ_i es la proporción de individuos de la i -ésima especie $= n_i / N$.

Por otro lado, se calculó el Índice de Simpson para comparar la diversidad entre los sitios, ya que reduce el efecto del submuestreo de especies y, por tanto, permite una mejor comparación entre comunidades con alta dominancia de unas pocas especies (Lozano-Peña et al., 2019). Representa un índice inverso a la equidad o uniformidad, ya que toman en cuenta la representatividad de los taxones y sus valores de importancia más grandes, sin evaluar la contribución del resto. El índice Simpson muestra la probabilidad de que dos individuos tomados aleatoriamente de una muestra sean de la misma especie y está influido por los taxones con mayor dominancia (Moreno, 2001), varía inversamente con la heterogeneidad; por ejemplo, los valores del índice decrecen o aumentan según aumenta o decrece la diversidad. Al ser un índice de dominancia, sobrevalora las especies más abundantes en disminución de la riqueza total. Sus valores van de cero a s (riqueza total), tiende a cero cuando las comunidades son poco diversas y a s cuando las comunidades tienen una máxima equitatividad (Soler et al., 2012). Fue calculado con el programa Past 4 con la siguiente fórmula.

$$\lambda = \sum \rho_i^2 \text{ (Moreno, 2001)}$$

ρ_i = abundancia proporcional de la especie i , es decir, el número de individuos de la especie i dividido entre el número total de individuos de la muestra.

Con la finalidad de determinar el esfuerzo de muestreo, se realizó un análisis de rarefacción. Este método calcula el número esperado de especies de cada muestra, si estas fueran reducidas a un tamaño estándar; se suele usar para comparar muestras de diferentes tamaños (Moreno, 2001), basándose en el tamaño de muestra más pequeño, por lo cual se puede “desaprovechar” información de las muestras con mayor esfuerzo de muestreo. Sin embargo, sobre esta base se pueden contrastar comunidades a través de los índices de diversidad, de manera más “justa”, aunque exista diferente esfuerzo de muestreo (Willis, 2019). Los análisis de rarefacción fueron calculados de acuerdo a la formula:

$$E(S) = \sum 1 - \frac{(N-N_i)/n}{N/n} \text{ (Moreno, 2001)}$$

Donde:

$E(S)$ = número esperado de especies

N = número total de individuos en la muestra

N_i = número de individuos de la i -ésima especie

n = tamaño de la muestra estandarizado

Las estimaciones fueron realizadas por sitios (ej. Kinchil, Sisal, Corchito, Telchac y Río Lagartos) y por zonas (ej. oeste, centro y este). Los análisis de rarefacción fueron estimados con la varianza condicional con un 95 % de confianza y graficados mediante el programa Past 4.

El índice de Valor de Importancia (IVI) fue estimado para identificar la importancia ecológica relativa de las especies de plantas en una comunidad (Soler et al., 2012). Para cuantificar

el IVI, se requirió calcular la densidad, frecuencia y dominancia relativa (o cobertura) de la muestra (sitios de estudio). El IVI es un índice de importancia estructural desarrollado principalmente para jerarquizar la dominancia de especies en bosques (Curtis y McIntosh, 1951; Corella et al., 2001; Zarco-Espinosa et al., 2010) y en este caso se utilizó para cuantificar la estructura y composición florística de las especies muestreadas, exceptuando a las enredaderas, epífitas y parásitas. El IVI es la sumatoria de los valores relativos de densidad, frecuencia y cobertura, de esta manera se obtiene la jerarquización de la dominancia de las especies (Zarco-Espinosa et al., 2010). La densidad se define como el número de individuos por unidad de área o área de muestreo (Kronenfeld y Wang 2007; Zamora-Crescencio et al., 2008; Martínez-Antúnez et al., 2013). La frecuencia es el porcentaje de incidencia de una especie en un número de sitios dado, representa una medida de distribución (Zamora-Crescencio et al., 2008; Martínez-Antúnez et al., 2013).

El IVI se calculó de la siguiente manera:

$$\text{IVI} = \text{Densidad relativa} + \text{frecuencia relativa} + \text{dominancia relativa (cobertura)}$$

$$\text{Densidad relativa} = \left(\frac{\text{Núm. de individuos de la especie}}{\text{Núm. total de individuos}} \right) \times 100 \text{ (Zamora – Crescencio et al., 2008)}$$

Frecuencia relativa

$$= \left(\frac{\text{Frecuencia absoluta de la especie}}{\text{Frecuencia absoluta de todas las especies}} \right) \times 100 \text{ (Zamora – Crescencio et al., 2008)}$$

$$\text{Frecuencia absoluta} = \frac{\text{Núm. de cuadros donde se presenta la especie}}{\text{Número total de cuadros muestreados}}$$

La dominancia se calculó como cobertura, debido al hábito herbáceo de la mayoría de las especies presentes en el estudio, mediante las siguientes formulas:

$$Cobertura\ relativa = \left(\frac{Cobertura\ absoluta\ de\ la\ especie}{Cobertura\ absoluta\ de\ todas\ las\ especies} \right) \times 100$$

$$Cobertura\ absoluta = \frac{Cobertura\ de\ la\ especie}{\text{Área muestreada}}$$

La cobertura se calculó mediante la fórmula del área de una elipse (Zarco-Espinosa et al., 2010):

$$A = \pi * \alpha * \beta \text{ siendo } \pi = 3.1416 \quad \alpha = \text{semieje mayor} \quad \beta = \text{semieje menor}$$

El IVI suele ser usado solo en especies arbóreas, sin embargo, en esta tesis se consideró su uso, incluso, herbáceas y arbustivas, ya que se hicieron mediciones exhaustivas de los individuos encontrados en los transectos.

La curva de rango-abundancia fue estimada con la finalidad de evaluar la abundancia y equidad de las especies (Cruz-Elizalde y Ramírez-Bautista, 2012), ya que son utilizadas como indicadores ecológicos usados para visualizar características de la distribución de la abundancia de una comunidad. Una característica muy importante de estas curvas es que presentan las especies con abundancias dominantes respecto al resto (Izsák y Pavoine, 2012). Se construyen ordenándolas de acuerdo a sus abundancias relativas y se les asigna un rango de acuerdo con la misma, por lo tanto, los taxones más comunes (con más individuos) ocupan los primeros lugares y los raros, los últimos (MacArthur, 1957; Rocchini y Neteler, 2012). Se hizo el análisis con el lenguaje R, usando el programa RStudio 2022.07.2, con la paquetería *BiodiversityR* con la función *rankabundance* y se graficó con la función *rankabunplot*. Se realizó con los cinco sitios de estudio de forma general y por zonas (oeste, centro y este). Las gráficas fueron editadas en el programa Inkscape 1.2.2 para acabados finales.

Diversidad funcional. A partir de los rasgos funcionales de las hojas antes medidos se calcularon otros: largo y ancho; área foliar específica, derivado del área foliar y peso seco; y el contenido de materia seca, derivado del peso fresco y seco, quedando definidos como: largo, ancho, grosor, índice de la hoja, área foliar, área foliar específica y contenido de materia seca (Cornelissen et al., 2003; Perez-Harguindeguy et al., 2013; Reyes-García et al., 2022; Zhang et al., 2022) (Tabla 3). Los valores de los rasgos funcionales fueron divididos por zonas, oeste, centro y este, así como una base que incluyó a todas las especies de los sitios. Antes de analizar los datos, se realizaron pruebas de normalidad, para evaluar normalidad en los atributos funcionales medidos, el test de Kolmogorov-Smirnov (con la corrección Lilliefors) para más de 50 observaciones y el test de Shapiro-Wilk para menos de 50, H_0 = los datos siguen una distribución normal, H_1 = no siguen una distribución normal. Las pruebas estadísticas se estimaron con el programa RStudio 2022.07.2, el paquete nortest y función lillie.test, y el paquete stats con la función shapiro.test, respectivamente. En caso de no ser normales, se procedió a normalizarlos con el logaritmo natural, con el paquete base, función log.

Tabla 3

Rasgos funcionales de las hojas elegidos para evaluar la diversidad funcional

Atributo	Abreviación	Definición	Significado ecológico	Unidad
Largo de la hoja	L	La parte media más larga de la hoja	Refleja la eficiencia fotosintética de las plantas	mm
Ancho de la hoja	A	La parte media más corta de la hoja	Indica la eficiencia fotosintética de las plantas	mm
Grosor	G	Espesor de la lámina en la parte más ancha	Refleja la capacidad de retención de agua y resistencia a sequías.	mm
Índice de la hoja	I.H	Cociente del largo y ancho de la hoja	Indica las características geométricas de las hojas	mm
Área foliar	A.F	Área de la superficie de la hoja	Refleja el área de uso efectivo de las hojas de las plantas para la fotosíntesis	cm ²
Área foliar específica	A.F.E	Cociente del área foliar y el contenido de materia seca	Indica la tasa fotosintética y de crecimiento relativo y la utilización de nutrientes	cm ² ×g ⁻¹
Contenido de materia seca	C.M.S	Cociente de la masa seca y fresca	Refleja su resistencia mecánica, inflamabilidad y capacidad de adquirir recursos	g×g ⁻¹

Notas. Fuente: Ma et al., 2022; Zhang et al., 2022; Reyes-García et al., 2022; Niklas et al., 2023.

A partir de los rasgos funcionales se realizó el agrupamiento jerárquico, que consiste en construir un árbol de combinación binario, a partir de los elementos de datos almacenados en los nodos “hojas”, fusionando de dos en dos los subconjuntos "más cercanos" hasta llegar a la raíz del árbol que contiene todos los elementos de X, representados gráficamente en un dendograma (Nielsen, 2016), el cual se define como un diagrama en forma de árbol que registra las secuencias

de fusiones o divisiones. Se utilizó el programa RStudio 2022.07.2, paquete y función *pvcclus*t para calcular los valores de p para el agrupamiento jerárquico a través de un remuestreo de arranque multiescalar (Suzuki y Shimodaira, 2006) con un método aglomerativo por promedio, que fue calculado por medio de la distancia euclidiana con valor p AU (aproximadamente insesgado), el cual representa a un vector numérico de los valores p , que es más preciso que el bp (probabilidad de arranque) (Suzuki et al, 2019). Se graficaron y agruparon de acuerdo al valor de umbral $\alpha = 0.90$, haciendo los cortes a una altura (definida como número de operaciones de fusión) cerca del valor dos para las zonas (oeste, centro y este) y cerca de 1.8 para el dendograma general.

Con la finalidad de reducir la dimensionalidad de los datos, se realizó un análisis de componentes principales (PCA, por sus siglas en inglés). Esta técnica ayuda a una mejor interpretación y a la vez reduce la pérdida de información, ya que encuentra variables lineales de los datos del conjunto original, que maximizan la varianza y no están correlacionados entre sí (Jolliffe y Cadima, 2016). Se realizó con el programa RStudio 2022.07.2, con el paquete *stats*, función *prcomp* de acuerdo a las zonas del gradiente (oeste, centro y este), así como de forma general (todas las especies) y las gráficas resultantes fueron editadas con el programa Inkscape 1.2.2.

Con base en el agrupamiento jerárquico y las características biológicas de las especies, se formaron los grupos funcionales en el análisis de componentes principales. Las gráficas fueron editadas con el programa Inkscape 1.2.2.

RESULTADOS

Diversidad taxonómica

Se registraron 147 taxones, 145 identificadas a nivel de especie (48 familias, 114 géneros). La familia Fabaceae es la más rica (19.05 % de las 145), seguida de Euphorbiaceae (Tabla 4). En cuanto a géneros, los más abundantes fueron *Ipomoea* y *Euphorbia*, con cinco y cuatro especies respectivamente. En cuanto al endemismo, se registraron 22 especies endémicas a la Provincia Biótica de Yucatán (Tabla 5), de las cuales el 35 % se encuentran en alguna categoría de riesgo según la IUCN (The International Union for Conservation of Nature) (Figura 9 y 10) y tres se encuentran en la NOM-059, en la categoría en peligro de extinción (P): *Mammillaria heyderi* subsp. *gaumeri* (Britton & Rose) D.R. Hunt (Cactaceae) y *Cochlospermum wrightii* (A.Gray) Byng & Christenh. (Bixaceae); así como *Conocarpus erectus* L. (Combretaceae) que se encuentra amenazada (A).

Tabla 4

Familias más abundantes y géneros con mayor número de especies del coquinal

Familia	No. especies	Género	No. especies
Fabaceae	28	<i>Ipomoea</i>	5
Euphorbiaceae	11	<i>Euphorbia</i>	4
Malvaceae	9	<i>Croton</i>	3
Cactaceae	7	<i>Portulaca</i>	3
Poaceae	7	<i>Rhynchospora</i>	3
Convolvulaceae	6	<i>Tillandsia</i>	3
Cyperaceae	6	<i>Vachellia</i>	3
Bromeliaceae	4	<i>Alternanthera</i>	2
Acanthaceae	4	<i>Bursera</i>	2
Verbenaceae	4	<i>Chamaecrista</i>	2

Tabla 5

Especies endémicas de la PBPY encontradas en los muestreos

Familia	Especie	Categoría de riesgo
Acanthaceae	<i>Justicia cardinalis</i> Carnevali & Duno	NE
	<i>Zephyranthes orellanae</i> Carnevali, Duno & J. L.	
Amaryllidaceae	Tapia	EN
Bromeliaceae	<i>Tillandsia dasyliirifolia</i> Baker	LC
	<i>Tillandsia yucatanana</i> Baker	NT
	<i>Mammillaria heyderi</i> subsp. <i>gaumeri</i> (Britton & Rose) D.R. Hunt	NT*
Cactaceae	<i>Opuntia inaperta</i> (A. Schott) D.R. Hunt	LC
	<i>Pilosocereus gaumeri</i> (Britton & Rose) Backeb.	LC
	<i>Selenicereus grandiflorus</i> (L.) Britton & Rose	
	ssp. <i>donkelaarii</i> (Salm Dyck) Ralf Bauer	LC
Campanulaceae	<i>Lobelia yucatanana</i> E. Wimm.	EN
Convolvulaceae	<i>Ipomoea sororia</i> D.F. Austin & Tapia-Muñoz	VU
Euphorbiaceae	<i>Acalypha gaumeri</i> Pax & K. Hoffm.	NT
	<i>Croton arboreus</i> Millsp.	LC**
	<i>Enriquebeltrania crenatifolia</i> (Miranda) Rzed.	LC
	<i>Jatropha gaumeri</i> Greenm.	LC
Fabaceae	*<i>Diphysa yucatanensis</i> Hanan-Alipi & M. Sousa	NE
	<i>Havardia albicans</i> (Kunth) Britton & Rose	LC
	<i>Senegalia gaumeri</i> (S. F. Blake) Britton & Rose	LC
	<i>Senna pallida</i> (Vahl) H.S.Irwin & Barneby	EN
Lythraceae	<i>Cuphea gaumeri</i> Koehne	LC
Malpighiaceae	<i>Malpighia spathulifolia</i> F.K. Mey.	LC
	<i>Myrmecophila christinae</i> Carnevali & Gómez-Juárez var. <i>christinae</i>	LC
Orchidaceae	<i>Neomillspaughia emarginata</i> (H. Gross) S. F. Blake	LC
Polygonaceae		

Notas. Abreviaciones: NE, No evaluado; EN, En peligro de extinción; LC, Preocupación menor; NT, Casi amenazado; VU, Vulnerable. *Enlistado en la NOM-061 como en peligro de extinción. **Endémica de México. Fuente: Elaboración propia con información de la IUCN Red List.

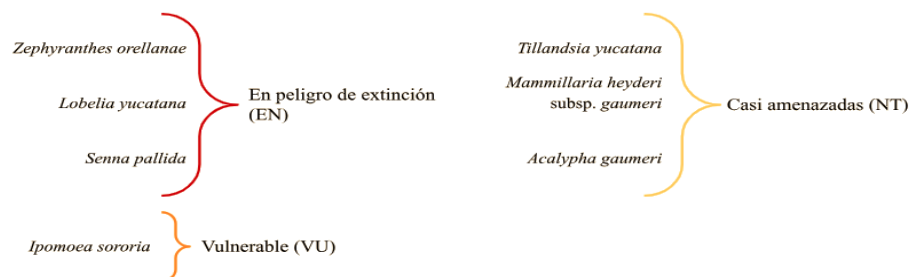


Figura 9. Especies endémicas de la PBPY.

Notas. Especies encontradas en los coquinales pertenecientes a alguna categoría de riesgo según la IUCN Red List.



Figura 10. Especies endémicas de la PBPY presentes en el coquinal.

Notas. A. *Justicia cardinalis* Carnevali & Duno (Acanthaceae). B. *Zephyranthes orellanae* Carnevali, Tapia-Muñoz & Duno (Amaryllidaceae). C. *Mammillaria heyderi* subsp. *gaumeri* (Britton & Rose) D.R.Hunt. (Cactaceae). D. *Cuphea gaumeri* Koehne (Lythraceae). Fotografías: A, D. Claudia Ramírez; B, C. Mayte Aguilar.

En la Tabla 6 se presentan la riqueza por sitios y los índices de diversidad de Shannon y Simpson:

Tabla 6

Valores de los índices de diversidad

Sitio	Riqueza (S)	Individuos (D)	Dominancia de Simpson (Cinv)	Diversidad según el inverso de Simpson (H)	Diversidad de Shannon (H)
Kinchil	62	2207	0.1881	0.8119	2.355
Sisal	52	421	0.06797	0.932	3.253
Telchac	57	1598	0.08214	0.9179	3.008
Corchito	51	458	0.09317	0.9068	3.046
Río Lagartos	43	634	0.07585	0.9242	2.98

Notas. Fuente: Elaboración propia con el programa Past.

La riqueza de especies cambia entre sitios, variando entre 43 (Río Lagartos), el sitio menos rico y 62 especies (Kinchil), el sitio más rico, mientras que Sisal, Telchac y Corchito presentaron valores de riqueza parecidos (51-57). En cuanto a la abundancia, el sitio con más individuos fue Kinchil y el que menos Sisal. El índice de diversidad de Shannon-Wiener, obtuvo su valor más bajo (menos diverso) en Kinchil (2.355) y el más alto (más diverso) en Sisal (3.253). Esto coincide con los resultados del índice de Simpson, que varía entre 0.8119 (Kinchil) y 0.932 (Sisal).

Los valores de la diversidad por zonas son diferentes (Tabla 7), ya que la zona con más riqueza de especies (90 especies) es la del centro (Telchac y Corchito), lo que coincide con los índices de Simpson (0.931) y Shannon (3.324). La zona menos rica fue el este (Río Lagartos), con solo 43 especies y 634 individuos. Sin embargo, la zona con menor diversidad según los índices fue el oeste (Kinchil y Sisal).

Tabla 7

Valores de los índices de diversidad por zonas

Región	Riqueza (S)	Individuos (D)	Dominancia Simpson (Cinv)	Diversidad según el inverso de Simpson (H')	Diversidad de Shannon (H)
Oeste	86	2628	0.1413	0.8587	2.764
Centro	90	2056	0.06902	0.931	3.324
Este	43	634	0.07585	0.9242	2.98

En los análisis de rarefacción se encontró que para Sisal, Corchito y Río Lagartos es necesario incrementar el muestreo, ya que la pendiente de la curva no logra estabilizarse; en el caso de Telchac y Kinchil, tienen su pendiente muy cerca de la asíntota (Figura 11); lo que significa que el muestreo casi registra todas las especies esperadas. En cuanto a las zonas, se encontró que la zona este tiene una pendiente creciente, el esfuerzo de muestreo es insuficiente, en comparación con las otras dos zonas (Figura 12).

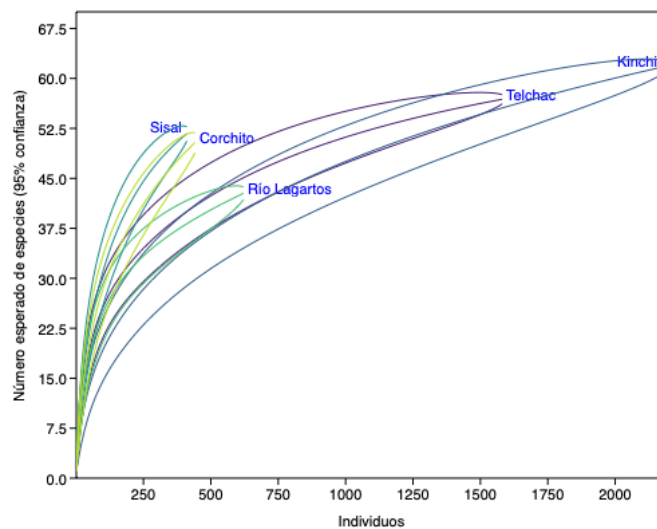


Figura 11. Análisis de rarefacción en los sitios muestreados en el estudio.

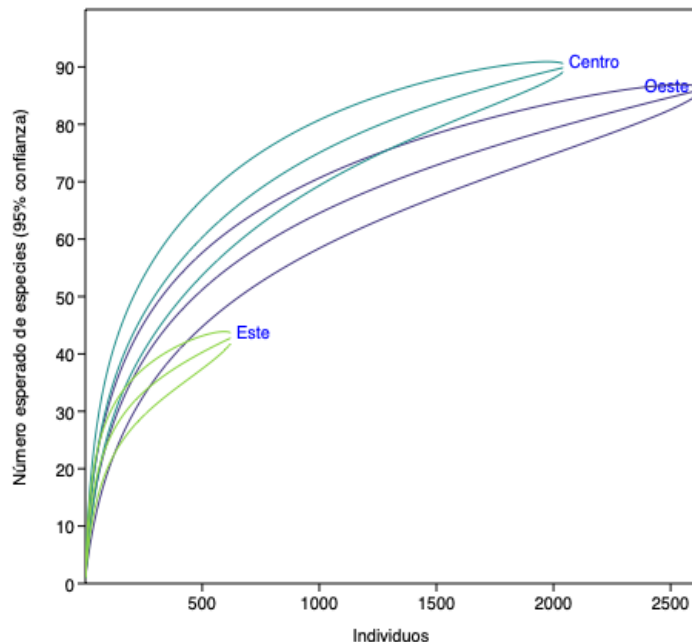


Figura 12. Análisis de rarefacción en cada una de las zonas muestreadas en el estudio.

La especie con el índice de valor de importancia más alto (28.56) fue *Haematoxylum campechianum* L., un árbol con una copa grande. La segunda especie fue una hierba muy común en las zonas abiertas de los coquinales, *Sida ciliaris* L. (23.99). *Phyla nodiflora* (L.) Greene. una hierba rastrera muy común en las zonas abiertas, fue la tercera (13.84), entremezclándose con *Sida ciliaris* L. y otras hierbas como *Evolvulus convolvuloides* (Willd. ex Schult.) Stearn.

Las diez especies con mayores valores del índice de valor de importancia (IVI) están presentadas en la Tabla 8, y algunas se encuentran en la Figura 13, contribuyendo con un 39.52 % de la suma total del índice (300) (Ver Anexo 1; Tabla de IVI completa).

Tabla 8

Las diez especies con los IVIs más altos

Especies	IVI
<i>Haematoxylum campechianum</i> L.	28.56
<i>Sida ciliaris</i> L.	23.99
<i>Phyla nodiflora</i> (L.) Greene.	13.84
<i>Cienfuegosia yucatanensis</i> Millsp.	13.22
<i>Ipomoea carnea</i> Jacq. subsp. <i>carnea</i>	10.17
<i>Agave angustifolia</i> Haw. var. <i>angustifolia</i>	6.70
<i>Ruellia paniculata</i> L.	6.33
<i>Gymnopodium floribundum</i> Rolfe	5.41
<i>Jatropha gaumeri</i> Greenm.	5.45
<i>Evolvulus convolvuloides</i> (Willd. ex Schult.) Stearn	4.90



Figura 13. Especies más importantes del coquinal según el Índice de Valor de Importancia.

Notas. En la Figura 13 se puede observar **A.** *Haematoxylum campechianum* L. (Fabaceae). **B.** *Cienfuegosia yucatanensis* Millsp. (Malvaceae). **C.** *Ipomoea carnea* Jacq. subsp. *carnea* (Convolvulaceae). **D.** *Evolvulus convolvuloides* (Willd. ex Schult.) Stearn (Convolvulaceae).

Fotografías: A-B. Mayte Aguilar; C-D. Claudia Ramírez.

El gráfico (Figura 14) de rango-abundancia de todas las especies mostró que la especie más abundante fue *Sida ciliaris* L., una pequeña hierba que forma manchones en las oquedades del

coquinal; otras especies que forman manchones también son dominantes: *Cienfuegosia yucatanensis* Millsp. y *Phyla nodiflora* (L.) Greene.

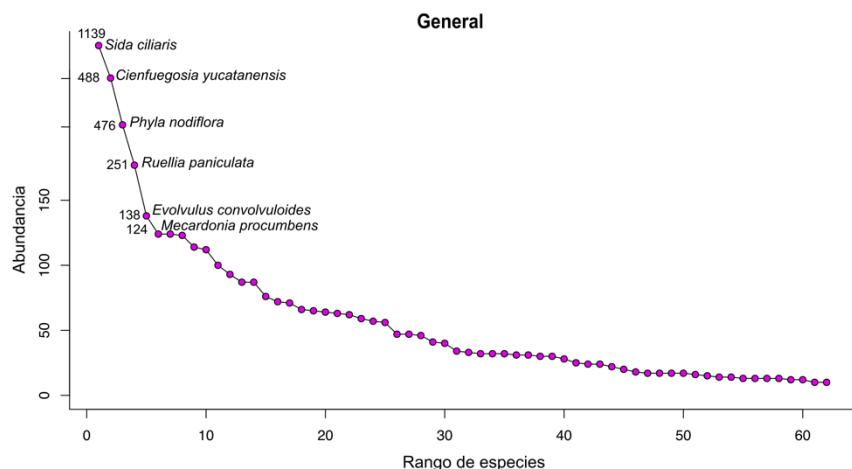


Figura 14. Curva de rango-abundancia con las seis especies más abundantes evaluadas.

Los resultados por zonas (Figura 15) muestran que la especie *Sida ciliaris* L. domina la zona oeste con 823 individuos, seguida por la *Phyla nodiflora* (L.) Greene. con 415 individuos y *Ruellia paniculata* L. con 251. En la zona centro la especie más abundante es *Cienfuegosia yucatanensis* Millsp. (346 individuos), muy característica del coquinal, seguida por *Sida ciliaris* L. (307 individuos) y *Portulaca oleracea* L. (118) (Figura 16). Cabe destacar que en esta zona, se encontraron ocho especies dominantes, un mayor número en comparación con las zonas restantes. En la zona este se encuentra dominada por seis especies, principalmente por *Desmanthus virgatus* (L.) Willd. (100 individuos), seguida por *Parmentiera millspaughiana* L.O.Williams (70 individuos) y *Trianthema portulacastrum* L. (65 individuos) (Figura 17).

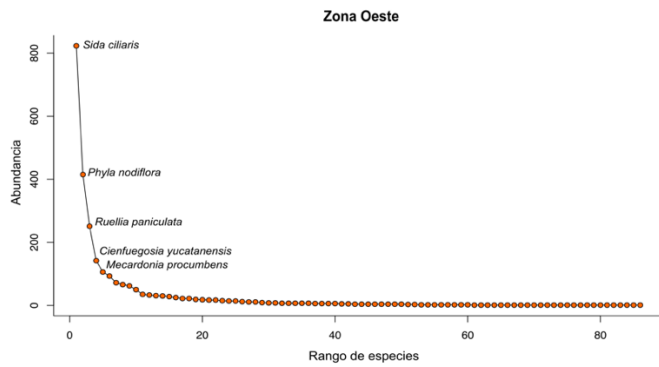


Figura 15. Curva de las especies encontradas en la zona oeste con sus respectivas abundancias.

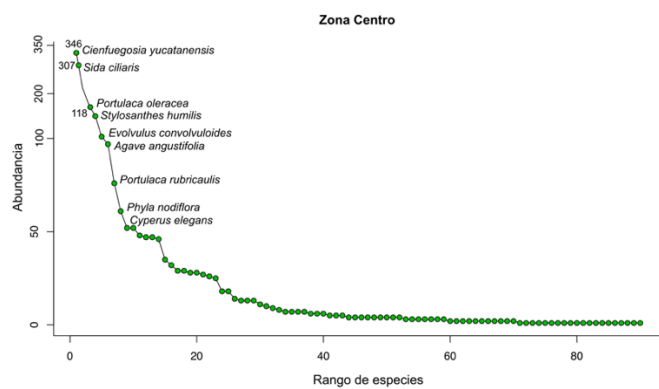


Figura 16. Curva de las especies encontradas en la zona centro.

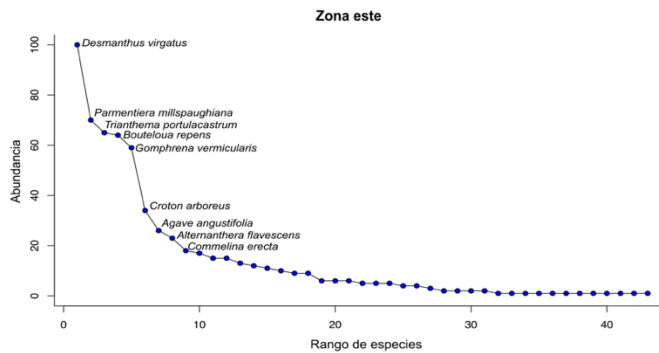
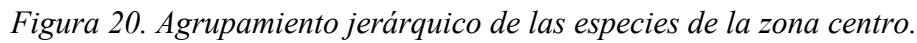


Figura 17. Curva de las especies encontradas en la zona este.

Diversidad funcional

El agrupamiento jerárquico general (para todas las especies) dio como resultado siete grupos funcionales reconocibles (Figura 18). En la zona oeste se encontraron cinco grupos: 1) el de hojas compuestas con folíolos diminutos (6.2 mm de largo en promedio), 2) el de hojas

compuestas con foliolos pequeños y hojas simples pequeñas (11.3 mm), 3) el de hojas simples medianas de diversas formas (40.7 mm), 4) el de hojas simples delgadas lanceoladas o alargadas y por último, 5) el de hojas simples grandes (72.5 mm) (Figura 19). Dos zonas incluyeron seis grupos funcionales: centro y este (Figuras 20 y 21). La del centro presentó los grupos del 1 al 6: 1) el de hojas compuestas con foliolos diminutos (6.2 mm de largo en promedio), 2) el de hojas compuestas con foliolos pequeños y hojas simples pequeñas (11.3 mm), 3) el de hojas simples medianas de diversas formas (40.7 mm), 4) el de hojas simples delgadas lanceoladas o alargadas, 5) el de hojas simples grandes (72.5 mm) y 6) hojas suculentas pequeñas alargadas (17.5 mm). La zona del este presentó seis grupos también (Figura 21), del 1-3, 5-6 y el 9 (hojas medianas ovaladas), que es un grupo exclusivo de la zona, con especies como *Randia aculeata* L., *Havardia platyloba* (Bertero ex DC.) Britton & Rose y *Evolvulus convolvuloides* (Willd. ex Schult.) Stearn.



Zona este

Altura

Distancia: Euclidiana

Método de conglomerado: promedio

GF 5

GF 9*

GF 3

GF 1

GF 6

GF 2

91

96

99

100

100

98

Ipomoea carnea

Solanum houstonii

Alternanthera flavescens

Bursera sinaruba

Varronia curassavica

Croton arboreus

Randia aculeata

Havardia platyloba

Evolvulus convolvuloides

Commelina erecta

Trianthema portulacastrum

Heliotropium angiospermum

Gymnopodium floribundum

Abutilon viscosum

Tara vesicaria

Tetramecium nervosum

Parmentiera millspaughiana

Galactia striata

Bonellia macrocarpa

Senna racemosa

Sideroxylon celastrium

Waltheria rotundifolia

Pithecellobium unguis-cati

Alternanthera obovata

Capraria biflora

Vachellia farnesiana

Desmanthus virgatus

Portulaca rubraulis

Gomphrena verticillaris

Mimosa distachya

Vachellia collinsii

Sida ciliaris

Neltuma juliflora

Figura 21. Agrupamiento jerárquico de la zona este.

Notas. GF = Grupo funcional

58

1. Hojas compuestas con foliolos diminutos: Representado por leguminosas (Fabaceae) caducifolias del estrato superior, con hojas compuestas con foliolos diminutos (3-6 mm de largo, con un promedio 6.2 mm de largo) y delgados que poseen tricomas, y en caso de ser glabras, poseen espinas en sus ramas. Las plantas son leñosas, cuentan con raíces fuertes que les permiten alcanzar el agua debajo de la cubierta caliza del coquinal y pueden llegar a medir hasta 4 m de altura. Las especies representativas son: *Havardia albicans* (Kunth) Britton & Rose, *Vachellia cornigera* (L.) Seigler & Ebinger, *Vachellia collinsii* (Saff.) Seigler & Ebinger y *Mimosa bahamensis* Benth.

2. Hojas compuestas con foliolos pequeños y hojas simples pequeñas: Representado por cerca de un 50 % de leguminosas (Fabaceae) caducifolias del estrato superior, con hojas compuestas con pequeños foliolos (7-18 mm de largo y un promedio 11.3 mm). La mayor parte de las especies que integran este grupo tienen hojas glabras y poseen espinas. En el caso de las hojas simples, la mayoría posee tricomas (las hierbas) y en un porcentaje menor látex (hierbas rastreras). Predominan los árboles/arbustos con un 62 %, siendo menos las herbáceas con un 38 %. Las hierbas crecen en zonas abiertas, en oquedades poco profundas con una pequeña cantidad de materia orgánica, formando manchones donde la roca no está fracturada, por lo que retiene humedad. Los árboles y arbustos crecen en áreas donde la roca se encuentra fracturada, tendiendo a evitar las zonas muy abiertas. Entre las especies representativas están: *Diphyssa yucatanensis* Hanan-Alipi & M.Sousa, *Mimosa distachya* var. *oligacantha* (DC.) Barneby, *Evolvulus convolvuloides* (Willd. ex Schult.) Stearn, *Sida ciliaris* L. y *Euphorbia adenoptera* Bertol.

3. Hojas simples medianas con diversas formas: En el grupo se encuentran especies con hojas simples de formas variadas, ovadas, obovadas, ligeramente alargadas, etc. Miden entre 19-98 mm de largo y 40.7 mm en promedio. Se puede referir a este grupo como el intermedio entre

los extremos de hojas compuestas con foliolos diminutos a hojas simples, grandes y gruesas. El 51 % son árboles chaparros y/o arbustos con espinas, el 36 % son hierbas con tricomas y hojas delgadas, y 10 % trepadoras. El 53 % de las especies tienen hojas simples de tamaño mediano con tricomas. El 25 % poseen hojas simples glabras un poco más gruesas que el grupo anterior y un porcentaje menor poseen espinas. A pesar de haber especies arbóreas, no suelen alcanzar su tamaño máximo, por lo que suelen crecer achaparrados, debido a la coraza que les impide llegar a sus máximas alturas. En este grupo destacan las hierbas trepadoras que poseen tricomas en sus hojas, y en caso de no tenerlos, sus hojas poseen un grosor mayor. Especies representativas: *Crescentia cujete* L., *Bursera schlechtendalii* Engl., *Waltheria rotundifolia* Schrank, *Commelina erecta* L., y *Varronia curassavica* Jacq. e *Ipomoea triloba* L.

4. Hojas simples delgadas linear-lanceoladas: Este grupo se compone por hierbas en el estrato inferior, anuales con hojas de 33-42 mm de largo, con 38 mm en promedio, con forma lanceolada. Habitan sobre la coraza en lugares abiertos que llegan a inundarse en épocas de lluvias. Especies representativas son: *Cienfuegosia yucatanensis* Millsp. y *Eclipta prostrata* (L.) L.

5. Hojas simples grandes y gruesas: En este grupo se encuentran especies con hojas simples grandes, de 48-100 mm de largo y 72.5 mm en promedio; de las cuales la mayoría son glabras, pero con un gran grosor de 0.4-0.9 mm, el grupo representa a las especies con mayor área foliar específica, tamaño y grosor de las hojas. Son principalmente árboles medianos que crecen en zonas abiertas, formando islas de vegetación para otras especies, incluso en ocasiones crecen individuos solitarios en zonas abiertas, de igual forma poseen raíces capaces de penetrar la coraza del coquinal. *Ipomoea carnea* Jacq. subsp. *carnea*, *Plumeria obtusa* L., *Jatropha gaumeri* Greenm. y *Neomillspaughia emarginata* (H.Gross) S.F.Blake son especies representativas del grupo.

6. Hojas suculentas pequeñas alargadas: En este grupo se encuentran pequeñas hierbas rastreras con hojas lanceoladas o alargadas de 12-23 mm de largo, 17.5 mm en promedio, con succulencia. *Portulaca halimoides* L., *Portulaca rubricaulis* Kunth y *Gomphrena vermicularis* L. son especies características de este grupo. Este grupo es exclusivo de las zonas centro y este.

7. Hojas suculentas obovadas: En este grupo se encuentran pequeñas hierbas rastreras con hojas obovadas o elípticas de 20-25 mm de largo, con 19.3 mm en promedio con un grosor 0.5-0.9 mm, la mayoría son suculentas. *Portulaca oleracea* L., *Trianthema portulacastrum* L. y *Phyllanthus nodiflorus* (L.) Greene. son especies representativas de este grupo.

***8. Hojas modificadas:** Este grupo no pudo ser evaluado ya que sus hojas han sido transformadas a espinas, por lo que se considera un grupo aparte. Especies representantes: *Opuntia stricta* (Haw.) Haw., *Mammillaria heyderi* subsp. *gaumeri* (Britton & Rose) D.R.Hunt, *Acanthocereus tetragonus* (L.) Hummelinck y *Pilosocereus gaumeri* (Britton & Rose) Backeb.

En el PCA general, el 70.43 % de la varianza es explicada por los dos primeros componentes. Se puede observar que el primer componente explica el 48.56 % de la varianza, mientras que el componente dos explica solamente el 21.87 %. Siete grupos son recuperados (cada uno con un color diferente en la Figura 22), los cuales coinciden con los encontrados en el análisis jerárquico. La variación en el primer componente principal está mejor representada por las variables, área foliar, largo y ancho, y en menor medida del grosor; en cambio, la variación en el componente dos, lo representan mejor las variables de área foliar específica, contenido de materia seca y del índice de la hoja.

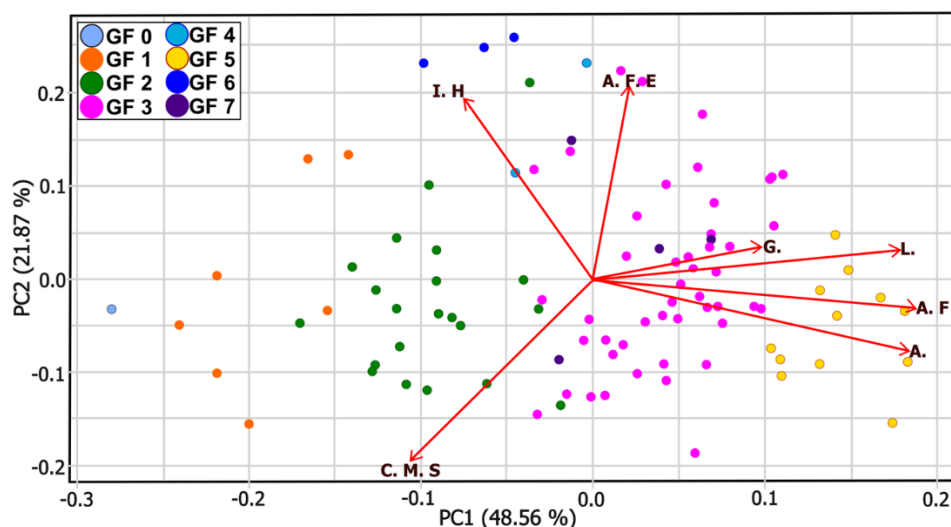


Figura 22. Componentes principales de los rasgos funcionales de las especies.

Notas. GF = 0 representa a especies que no forman parte de ningún Grupo funcional. GF = Grupo funcional.

El análisis de PCA realizado por zonas mostró que para la zona oeste (Kinchil y Sisal), los dos componentes principales explican el 81 % de la varianza de los datos (Figura 23). El PCA para esta zona sugiere cinco grupos funcionales. En el componente uno las variables que tienen más influencia son área foliar, área foliar específica, así como el largo y ancho; por otra parte, en el componente dos tienen más peso el índice de la hoja, el contenido de materia seca y el grosor.

En la zona centro se puede observar que el componente uno y dos explican el 74 % de la varianza total, reconociendo seis grupos funcionales (Figura 24). El área foliar, ancho y largo son las variables que más influencia tienen en la variación de los datos en el primer componente, mientras que en el componente dos, el índice de la hoja, contenido de materia seca, área foliar específica y en menor medida el grosor son las variables más influyentes.

En la zona este (Figura 25), los primeros dos componentes explican el 73 % de la varianza y forman seis grupos. Las variables importantes en el componente uno son el área foliar, seguido

del largo y ancho y en el segundo, el índice de la hoja y el contenido de materia seca son las variables que presentan mayor influencia.

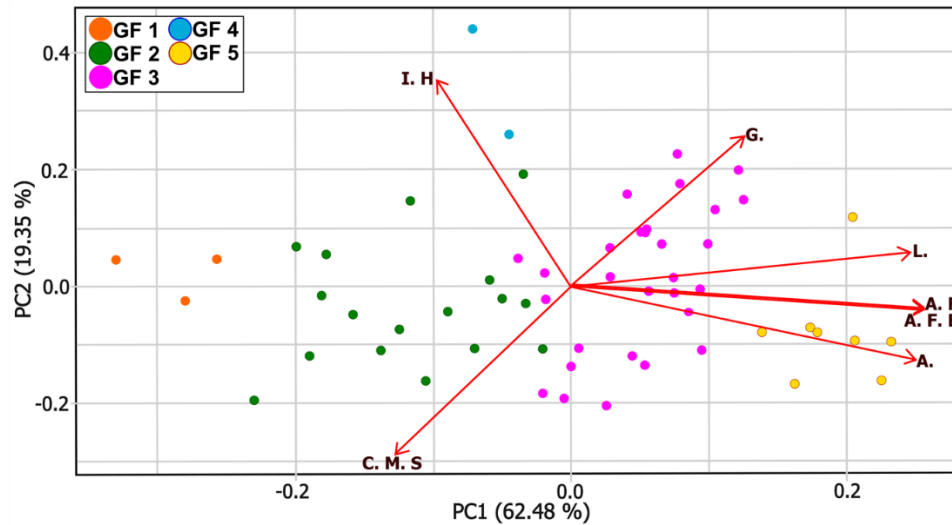


Figura 23. Componentes principales encontrados en la zona oeste.

Notas. GF = Grupo funcional

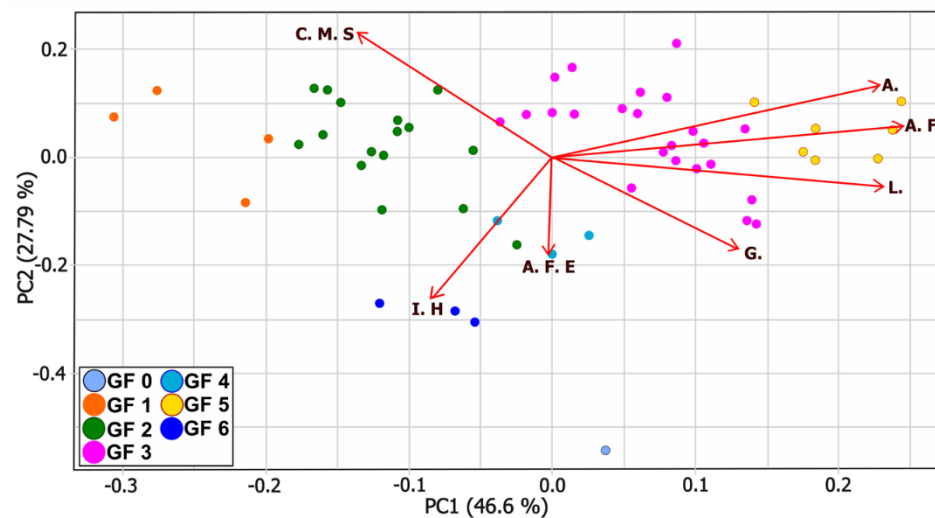


Figura 24. Componentes principales encontrados en la zona centro.

Notas. GF = 0 representa a especies que no forman parte de algún Grupo funcional. GF = Grupo funcional

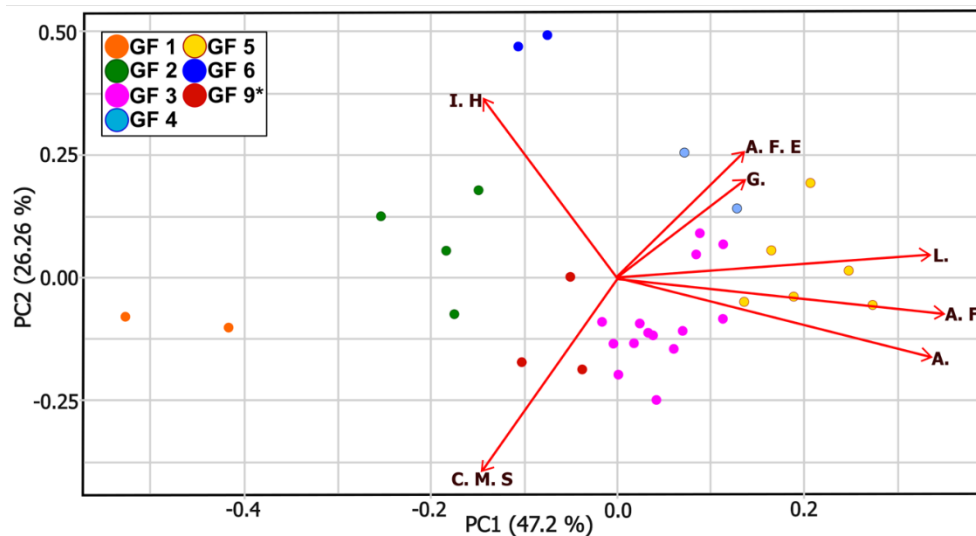


Figura 25. Componentes principales de la zona este.

Notas. GF = Grupo funcional. Los puntos azules claros indican especies fuera de los grupos.

DISCUSIÓN

Diversidad taxonómica

En el área total muestreada, las familias con mayor riqueza taxonómica fueron Fabaceae y Euphorbiaceae, siguiendo el mismo patrón encontrado en otros estudios en selvas bajas secas (González-Iturbe et al., 2002; Leirana-Alcocer et al., 2009; Hernández-Ramírez y García-Méndez, 2015; Sánchez et al., 2016; Oliveira et al., 2022). La familia Fabaceae representa una de las familias más abundantes, diversas e importante ecológica y económicamente a nivel global, nacional, así como en la Península de Yucatán (Rudd, 1968; Flores, 1990; Duno de Stefano et al., 2006; Flores et al., 2006; Lott y Atkinson, 2010; Hernández-Ramírez y García-Méndez, 2015), lo cual concuerda con el presente estudio. Incluso hay quienes mencionan que esta familia se encuentra en todas las

comunidades vegetales presentes en la península de Yucatán (Flores, 2001; Zamora-Crescencio, 2008, Leirana-Alcocer et al., 2009; Dzib-Castillo et al., 2014; Zamora-Crescencio et al., 2020). Esto puede deberse a su resistencia a perturbaciones como incendios o sequías, además de poseer semillas con cubiertas duras, y su capacidad de hacer simbiosis con microorganismos fijadores de nitrógeno, proporcionándoles una ventaja competitiva respecto a otras familias botánicas (González-Iturbe et al., 2002; Leirana-Alcocer et al., 2009). El presente estudio incluso registró un mayor número de especies de Fabaceae y Euphorbiaceae que estudios similares (e.j. Hernández-Ramírez, y García-Méndez, 2015; Ancona-Aragón et al., 2019).

Como se había mencionado, la segunda familia más rica fue Euphorbiaceae, una de las más grandes y diversas de todo México. Según Steinmann (2002), los géneros más diversos y representativos en Euphorbiaceae son *Euphorbia* y *Croton*, coincidiendo con lo registrado en este estudio con cuatro y tres especies respectivamente. Incluso creemos que podrían ser más especies, debido a la dificultad para identificarlas. Respecto a esta dificultad, Steinmann y Porter (2002) y Dorsey y colaboradores (2013), mencionan que basándose únicamente en caracteres morfológicos se puede llegar a cometer errores. Por otra parte, el género con más especies fue de la familia Convolvulaceae, *Ipomoea*; su riqueza en los coquinales podría ser explicada por su preferencia a sitios abiertos, así como ambientes secos como las selvas bajas caducifolias, caracterizadas por su baja altura (Tapia-Muñoz, 2011; Romero-Soler, 2021). *Ipomoea* se caracteriza por sus flores efímeras matinales (Leirana-Alcocer et al., 2019), lo cual puede complicar el proceso de identificación de las plantas al estar vegetativas (sin flores ni frutos) la mayor parte del tiempo; lo cual pone en consideración que el número de especies pudiera ser mayor al registrado en los transectos.

En cuanto a las zonas estudiadas, a pesar de que han sido diferenciadas por sus climas (Orellana et al., 2010; Cach-Pérez et al., 2013), Parra-Tabla y colaboradores (2018) mencionan que el oeste y centro de la Península de Yucatán son similares en su composición de especies de plantas debido a una semejanza ambiental entre ellas; lo cual concuerda con el presente estudio, ya que se encontró una riqueza y abundancia muy similar entre sí. Lo anterior contradice parcialmente la hipótesis del gradiente (White y Hood, 2004; Márdero et al., 2012; Castillo et al., 2016, Bautista et al., 2017, Munguía-Rosas et al., 2019), que predice una mayor diversidad hacia el noreste (Estrada, 1991; Orellana et al., 2010), sin embargo, es importante mencionar que el presente estudio se realizó únicamente en la temporada de sequía y un muestreo y análisis más exhaustivos son necesarios para entender de forma más precisa la diversidad taxonómica y las relaciones entre las zonas y sitios.

Respecto al endemismo, varios autores concuerdan que un elevado número de taxones endémicos a la Provincia Biótica Península de Yucatán (PBPY) se encuentran en lo que describen como islas de vegetación seca, rodeadas por el mar o por asociaciones vegetales más húmedas hacia el sur, conteniendo diversas especies de la familia Cactaceae (Carnevali et al., 2003; Espadas-Manrique et al., 2020), lo cual se puede constatar con lo encontrado en nuestro estudio.

Los resultados del presente estudio refuerzan las afirmaciones previas, ya que el endemismo fue un elemento con una representación importante respecto a las registradas para la PBPY (Carnevali et al., 2021), de hecho, Duno de Stefano y colaboradores (2024) afirman que la vegetación asociada a los coquinales alberca una flora especializada, adaptada a altas temperaturas y a severas sequías estacionales, lo cual es explicado en parte porque las zonas estudiadas se ubican geográficamente en dos de las cinco áreas de la Península de Yucatán ricas en endemismos (Carnevali et al., 2021), las cuales pueden ser explicadas en parte por el gradiente, que determina

que las partes subáridas norte y noroeste queden aisladas por las zonas subhúmedas y húmedas en el sur y sureste, y por el Mar Caribe y el Golfo de México en el norte y oeste (Estrada, 1991).

A pesar de haber registrado varias especies endémicas, hay algunas reportadas en los coquinales (Carnevali et al., 2016; Espadas-Manrique et al., 2020), que no fueron registradas en los muestreos, tales como *Ruehssia calichicola* (Carnevali & Juárez-Jaimes) L.O.Alvarado, conocida por una sola población con menos de 2 km² de área, que habita exclusivamente en un coquinal localizado cerca de la carretera Chicxulub Puerto-Chicxulub Pueblo (Carnevali et al., 2016); *Beaucarnea pliabilis* (Baker) Rose, la cual es conocida localmente como “despeinada”, una especie amenazada según la NOM-059-SEMARNAT-2010 (Espadas-Manrique et al., 2018, Espadas-Manrique et al., 2020); *Angelonia parviflora* Barringer, una especie que se encuentra aislada geográficamente de otras de su mismo género (Barringer, 2010). Además, Carnevali y colaboradores (2022a, 2022b) han descrito *Heteranthera yucatanica* Carnevali, Tapia-Muñoz & J.R. Grande, una especie semi-acuática de la familia Pontederiaceae que habita las lagunas del coquinal y se encuentra en peligro de extinción, ya que sus poblaciones ocupan menos de 12 km² de área. Aunado a esto, existen dos especies endémicas del propio Coquinal *Zephyranthes orellanae* Carnevali, Tapia-Muñoz & Duno e *Ipomoea sororia* D.F.Austin & J.L.Tapia (Duno de Stefano et al., 2024), las cuales han sido consideradas en peligro de extinción (EN) y vulnerable (VU) respectivamente con base en los criterios de la IUCN (Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza y los Recursos Naturales (UICN)) (Carnevali et al 2021; Duno de Stefano et al., 2024). Su vulnerabilidad podría ser explicada por la especialización ecológica, que los hace más propensos a la extinción que especies generalistas, porque tienden a tener una distribución más restringida (Vázquez y Simberloff, 2002), esta especialización al mismo tiempo reduce la capacidad de adaptación a un disturbio repentino, por ejemplo a la pérdida de hábitat; además de

la baja densidad de individuos de las especies implicadas, provocando que se eleven los riesgos de extinción por encima de lo esperado (Brook et al., 2008).

Por otro lado, la medición de los índices de diversidad fue fundamental, ya que de acuerdo con Velásquez y colaboradores (2012) permiten evaluar las formas de adaptación y estabilización de las comunidades a perturbaciones antrópicas o naturales y las poblaciones más diversas son aquellas que presentan los índices más altos, con dominancias bajas y alta equitabilidad (Jost y González-Oreja, 2012; Valbuena et al., 2012), por lo tanto, el sitio estudiado con mayor resiliencia debido a su alta diversidad taxonómica fue Sisal, a pesar de tener la menor abundancia de individuos entre los sitios; cuya dominancia está dada principalmente por *Cienfuegosia yucatanensis* Millsp., una especie que se ha considerado representativa de los coquinales, ya que puede resistir la temporada inundada (Duno de Stefano et al., 2024).

El Corchito fue el segundo sitio con la mayor diversidad taxonómica, lo cual puede deberse al efecto de estar muy cerca de la Reserva Ecológica El Corchito, ya que se ha demostrado que las Áreas Naturales Protegidas y las reservas ecológicas resguardan una alta diversidad, tanto taxonómica como ecológica (Geldmann et al., 2013; Vačkář et al., 2016; Ortiz-Medina et al., 2022), y por lo mismo pueden tener impacto indirecto positivo en las áreas circundantes a ellas, conocido como “bloqueo” (Fuller et al., 2019; Fuller et al., 2020; Wolf et al., 2021), el cual se refiere a que la protección de las ANPs desmotiva la inversión en infraestructura o transporte de las áreas de los alrededores, resultando en una conservación de la biodiversidad más allá de los límites de las ANPs (Fuller et al., 2020). En el 2019 Fuller y colaboradores evaluaron 2,575 Áreas Protegidas y encontraron que los “bloqueos” son los impactos indirectos más frecuentes, lo cual puede ser el caso de El Corchito. La alta conservación del sitio provoca que el coquinal posea la mayoría de las epífitas registradas en los muestreos, orquídeas y bromelias como *Tillandsia dasylixiifolia* Baker,

T. recurvata (L.) L., *T. paucifolia* Baker (Bromeliaceae), *Cyrtopodium macrobulbon* (Lex.) G.A.Romero & Carnevali y *Myrmecophila christinae* Carnevali & Gómez-Juárez (Orchidaceae).

La presencia de epífitas es muy importante, ya que la mayoría son aéreas, por lo tanto, sin acceso al agua del suelo, encontrándose expuestas y dependiendo de las condiciones atmosféricas en el dosel de los árboles, lo que las vuelve sensibles a cualquier cambio provocado en ese microambiente tales como pérdida de hábitat por deforestación o alguna otra perturbación causada por el hombre (Cach-Pérez et al., 2013; Krömer et al., 2014). De tal forma que son consideradas como indicadores de la calidad ambiental, ya que obtienen nutrientes y agua de la atmósfera por medio del rocío, la lluvia y neblina, a través de estructuras especializadas en sus hojas (Graciano et al., 2003; Elias et al., 2008). Otros organismos considerados bioindicadores son los líquenes (Ochoa-Jiménez et al., 2015; Ramírez-Morán et al., 2016), que de igual forma se han observado en El Corchito, en especies como *Bursera schlechtendalii* Engl. o *Enriquebeltrania crenatifolia* (Miranda) Rzed. Se asocian al estado de conservación de los sitios, ya que si las condiciones abióticas se deterioran (ejemplo: cambios en el metabolismo del agua, radiación solar, temperatura y presencia de sustancias tóxicas en la atmósfera), el alga que se encuentra asociada al hongo, muere, rompiendo el estrecho equilibrio que permite la asociación exitosa de estos organismos (Herrera-Campos et al., 2014; Grüniger y Velarde, 2015). Entre las especies de epífitas bromeliáceas se encontraron: *T. dasyliriifolia*, que de acuerdo con Castillo y colaboradores (2016) han demostrado ser especies moderadamente resistentes a la sequía y temperaturas extremas, si se comparan con otras plantas más suculentas, incluso encontraron una correlación positiva entre el tamaño, el tiempo que tardan en morir y los intervalos de temperaturas que pueden tolerar, favoreciendo las más grandes de tamaño; debido a que toleran intervalos más grandes de temperatura y tardan más en morir, debido a que forman rosetas tienen la capacidad de hacer un tanque y almacenar agua, y las bromelias pequeñas no la tienen en las primeras etapas, y tienden a

desecarse en mayor medida. Otras como *T. paucifolia*, poseen una alta succulencia, lo que les permite almacenar agua en sus tejidos y resistir a la sequía, a altas temperaturas y a mucha luz (Cach-Pérez et al., 2018). Otro factor que les permite sobrevivir a ambientes tan secos es la presencia de tricomas foliares peltados, en forma de un manto aterciopelado grisáceo, característico de especies que habitan ambientes muy secos y con alta radiación solar. Ayudan a captar el agua de la lluvia, del rocío o de la escorrentía por las ramas de sus plantas hospederas (forofito) (Mondragón-Chaparro et al., 2011).

El Corchito también se encuentra muy cerca del parque Eólico de Progreso, el cual podría tener efectos negativos en la comunidad de plantas a mediano y largo plazo, ya que se ha demostrado que la vegetación es afectada debido a la presión antrópica de la construcción de edificios auxiliares, caminos de acceso, así como labores de desbroce y retiro de la cubierta del suelo en algunas partes (Molina y Tudela, 2006).

Contrario a lo que se esperaba, Río Lagartos fue el segundo sitio menos diverso. Esto contradice lo que sugieren varios estudios en los cuales mencionan que las condiciones ambientales del noreste de la PY favorecen la diversidad biológica (White y Hook, 2004; Orellana et al., 2010), por tanto, se esperaría que en Río Lagartos la diversidad fuera mayor que los otros sitios. Por ejemplo, Ortiz-Medina y colaboradores (2022) encontraron una gran diversidad de anfibios y reptiles en La Reserva de la Biosfera Ría Lagartos (RBRL), en vegetaciones de selva baja inundable y selva mediana subperennifolia y González-Moreno y colaboradores (2017), mencionan que encontraron más especies de insectos parasitoides de la familia Ichneumonidae para la zona de RBRL que todas las especies registradas para todo Yucatán, lo cual sugiere la gran diversidad en esa zona. No obstante, la baja diversidad encontrada en este sitio puede deberse a la perturbación antropogénica (Espinosa et al., 2016), ya que el sitio estudiado se encuentra muy cerca del basurero

a cielo abierto del municipio de Río Lagartos, lo cual representa un grave problema medioambiental, ya que no suelen tener ningún control técnico, sanitario, ni operativo y terminan contaminando el suelo, agua y aire (Piza et al., 2020), a través de derrames de residuos tóxicos en el suelo, mediante la filtración de los mismos y contaminando el manto freático (Miranda-Samper et al., 2023). Belabed, Lotmani, y Romane (2014) encontraron que una alta concentración de contaminantes como metales pesados, afectan el crecimiento de las plantas, por lo tanto, de la biodiversidad, ya que las plantas sensibles no pueden sobrevivir, aunque mencionan que algunas especies presentan tolerancia por medio de mecanismos como desintoxicación, inmovilización y acumulación.

Kinchil fue el área con mayor riqueza específica y abundancia de individuos, solo por debajo de El Corchito; sin embargo, en los índices de diversidad alfa se indica que es el sitio menos diverso de todos, debido a la alta dominancia obtenida, propiciada por especies como *Sida ciliaris* L. y *Phyla nodiflora* (L.) Greene.; que aumentan las curvas de rango-abundancia, por lo tanto, influyen mucho en los patrones generales de dominancia de las plantas en las comunidades (Parra-Tabla et al., 2018).

Las curvas de rarefacción en nuestros análisis, mostraron una curva cercana al alcance de la asíntota en el caso de Telchac y Kinchil, lo que sugiere que el esfuerzo de muestreo fue muy cercano al óptimo y un mayor esfuerzo de muestreo probablemente ya no logre un mayor registro de especies. La mayor riqueza y una gran cantidad de endemismos en el sitio Kinchil puede deberse a que las especies se han adaptado a las condiciones difíciles de sequía y altas temperaturas Carnevali et al. (2010b).

La hipótesis de que la diversidad aumenta de noroeste a noreste se cumplió parcialmente, ya que Kinchil presentó la menor diversidad, mientras que en el centro se presentó la mayor, esto puede ser explicado porque si bien la temperatura aumenta de forma constante de oeste a este, la menor y mayor precipitación se encuentran en el centro y este respectivamente (Munguía-Rosas et al., 2019), aún así las plantas parecen adaptarse muy bien a estas condiciones de aridez, lo cual explicaría la mayor diversidad y endemismo.

Respecto a los resultados encontrados en el índice de valor de importancia, *Haematoxylum campechianum* L. fue la especie más importante, esto puede ser explicado por su gran cobertura arbórea, en comparación con otras especies mayormente herbáceas o arbustos que se encuentran en el coquinal. Además, presenta una floración abundante que atrae a muchos polinizadores como abejas nativas, lo cual lo convierte en un elemento muy importante. El segundo valor de importancia más alto (*Sida ciliaris* L.) es explicado por su abundancia y frecuencia, ya que actúa como una hierba que tiende a cubrir áreas considerables, además de producir flores y frutos a lo largo de todo el año (Duno de Stefano et al., 2010), lo que le permite reproducirse exitosamente. En el caso de *Phyla nodiflora* (L.) Greene. es una hierba que se postra en la coquina, extendiéndose mediante el enraizamiento de sus nudos. Las especies con valores más altos de importancia se pueden considerar representativas de los coquinales, ya que las especies más frecuentes son las más abundantes (Martínez-Antúnez et al., 2013).

Diversidad funcional

La diversidad funcional puede ser medida mediante el número de grupos funcionales derivados de atributos funcionales de diferentes estructuras vegetales como las hojas (Petchey y Gaston, 2002), las cuales son consideradas sensores ambientales que proporcionan a las plantas

información valiosa sobre las condiciones de sus hábitats (Sandoval-Granillo y Meave, 2023), como en los coquinales, donde el ambiente representa un filtro para las plantas (Aguilar-Canché et al., 2022). A pesar de la importancia de entender el funcionamiento de los ecosistemas, los estudios de diversidad funcional en comunidades biológicas han sido escasos y relativamente recientes (Oliveira et al., 2022; Sandoval-Granillo y Meave, 2023). Las comunidades de plantas no han sido la excepción y el conocimiento de la diversidad funcional en las selvas bajas caducifolias y en particular en los coquinales, ha sido casi nulo (Aguilar-Canché et al., 2024), por lo que este estudio representa a nuestro conocimiento el primer estudio que intenta entender la diversidad del Coquinal.

Los resultados en los análisis de agrupamiento jerárquico y componentes principales sugirieron ocho grupos funcionales. El significado biológico de estos grupos se enlista a continuación:

1.Hojas compuestas con folíolos diminutos: Esta estrategia está representada por la reducción del área foliar (folíolos) y con ello el tamaño general de las hojas y grosor. Las hojas compuestas son más eficientes a la hora de perder calor a través de procesos convectivos (energía disipada de forma pasiva), y esto conduce a temperaturas foliares más bajas y a una menor pérdida de agua por transpiración (energía disipada bajo el control de la planta), respecto a las hojas simples de un tamaño similar (Malhado et al., 2010). La ventaja de la estructura foliar compuesta se deriva de que el raquis funciona como una ramita “barata” y “desechable” (en términos fisiológicos), disminuyendo así la necesidad de ramificación permanente e inversión en estructuras leñosas y promoviendo así un rápido crecimiento vertical (Malhado et al., 2010). Asimismo, el grupo posee el más alto contenido de materia seca de todos los grupos, el cual está asociado con la densidad promedio de los tejidos de las hojas (Perez-Harguindeguy et al., 2013), al mismo tiempo que les

provee una mayor resistencia contra daños bióticos, salinidad e incluso inundaciones (Cornelissen et al. 2003; Arellano-Rivas et al., 2018). De la misma forma, el alto contenido de materia seca y la baja área foliar específica presentadas, así como el menor grosor, se ha relacionado con especies tolerantes a la sombra (Cornelissen et al., 2003; Gianoli, 2004; Poorter, 2009), lo cual podría explicar las islas de vegetación formadas por estas especies, que consisten en fragmentos de hábitat ricos en nutrientes, humedad y materia orgánica rodeados de una matriz, en la que los suelos tienen una baja fertilidad y la cobertura vegetal muy escasa (Leirana-Alcocer y Bautista-Zúñiga, 2014), funcionando como nodrizas. Se puede observar en la Figura 26 A) *Havardia albicans* (Kunth) Britton & Rose, una especie representativa de este grupo.

2.Hojas compuestas con foliolos pequeños y hojas simples pequeñas: Esta estrategia representa también la reducción del área fotosintética mediante los foliolos o a través de hojas simples pequeñas, esto implica que el tamaño general de las hojas es pequeño (poco largo, ancho, grosor, y área foliar y el segundo mayor contenido de materia seca de todos los grupos). Por lo tanto, este grupo presenta una buena resistencia mecánica de la hoja y está correlacionada con una baja área foliar específica y con el alto contenido de materia seca (Gorné et al., 2022). El tamaño pequeño de las hojas sugiere una respuesta al calor extremo, sequía y otros factores que estresan las plantas (Arellano-Rivas et al., 2018, Munguía-Rosas et al., 2019). Se puede observar en la Figura 26 B) *Diphyssa yucatanensis* A.M. Hanan & M. Sousa. representante del grupo.

3.Hojas simples medianas con diversas formas: Una parte de las especies tiene una gran área foliar específica y menor contenido de materia seca, lo que indica que crecen en sitios muy iluminados (Arellano-Rivas et al., 2018), por lo que presentan una estrategia de mayor adquisición de recursos, esto se refiere a que son plantas que producen hojas que no les cuesta tanto producirlas y que maximizan su captura de recursos y la otra parte se puede asociar a una tolerancia a la sombra

(Gianoli, 2004; Poorter, 2009), ya que cuentan con una área foliar específica relativamente baja con un mayor contenido de materia seca, que también se asocia con la asignación de biomasa a tejidos duraderos (Cornelissen et al., 2003), por lo que se asocia con una estrategia más conservadora (Munguía-Rosas et al., 2019 Liao et al., 2021), que a la vez puede ayudar a las plantas a protegerse de peligros físicos (Arellano-Rivas et al., 2018). Una parte de las especies tienen hojas simples de tamaño mediano con tricomas, los cuales protegen a las plantas de daños físicos por elementos ambientales como la radiación solar o el viento, así como bióticos al servir de barrera dañando físicamente a los herbívoros (Martínez y Espinosa, 2005). Una especie representativa es *Abutilon viscosum* (L.) Dorr. (Figura 26 C).

4.Hojas simples delgadas linear-lanceoladas: Se destacan por poseer una alta área foliar específica, la cual está relacionada con la tasa de crecimiento y fotosíntesis, cuando las plantas crecen en lugares muy iluminados tienden a tener valores más altos (Cornelissen et al., 2003; Poorter, 2009; Arellano-Rivas et al., 2018). Altos valores de fotosíntesis pueden ser asociados positivamente a ambientes con salinidad e inundaciones (Arellano-Rivas et al., 2018), lo cual concuerda con nuestros sitios de estudio que permanecen inundados en la temporada de lluvias. Una especie representante es *Cienfuegosia yucatanensis* Millsp. (Figura 26 D).



Figura 26. Especies representantes de los grupos funcionales.

Notas. Havardia albicans (Kunth) Britton & Rose. **B.** *Diphysa yucatanensis* A.M. Hanan & M. Sousa. **C.** *Abutilon viscosum* (L.) Dorr. **D.** *Cienfuegosia yucatanensis* Millsp. Fotografías: A. Germán Carnevali, B., C., Mayte Aguilar, D. Alfredo Dorantes

5.Hojas simples grandes y gruesas: El grosor está ligado a la resistencia mecánica de la hoja, por lo que ayuda a la vida útil de la hoja y al almacenamiento de agua. También está asociado a ambientes con incidencia solar alta, sequía extrema y por ende con menor fertilidad (Perez-Harguindeguy et al., 2013, Munguía-Rosas et al., 2019), además de ayudar a las hojas a resistir a la herbivoría y el daño físico (Gorné et al., 2022). Por otro lado, el aumento del área foliar también podría indicar bajas intensidades de luz, ya que de esa forma se incrementa la captura de fotones al maximizar la superficie fotosintéticamente activa (Gianoli, 2004).

Mientras que el tamaño de la hoja, se puede correlacionar con la tasa de crecimiento, también puede relacionarse con la capacidad fotosintética, además puede reflejar la capacidad competitiva de las especies (Liao et al., 2021; Su et al., 2021). Al ser árboles, pueden producir hojas nuevas durante la estación seca, debido a su capacidad para llegar a fuentes de agua subterráneas, ya que tienen sistemas de raíces más profundas, lo que permite su crecimiento cuando la radiación solar es más intensa (Alberton et al., 2019). Una especie representante es *Jatropha gaumeri* Greenm. (Figura 27 H).

6.Hojas suculentas pequeñas alargadas: Estas especies representan una de las estrategias más conocidas para ambientes con sequía extrema (Tinoco-Ojanguren y Vázquez-Yanes, 1983; Aguilar-Canché et al., 2024), exceptuando a los cactus. La succulencia es definida como la presencia de tejidos que almacenan agua (hidrénquima) (Grace, 2019), lo cual hace que tengan un mayor grosor, el cual se correlaciona positivamente con la regulación del calor (Arellano-Rivas et al., 2018). La succulencia es una adaptación que permite a las plantas colonizar pequeñas oquedades con una cantidad mínima de materia orgánica o sustrato. En las partes más secas de Yucatán existe una gran dominancia de especies con hojas suculentas, es decir, que usan una estrategia

conservadora de sus recursos (Munguía-Rosas et al., 2019). La suculenta representativa de este grupo es *Portulaca rubricaulis* Kunth (Figura 27 E).

7.Hojas suculentas obovadas: Este grupo también está representado por plantas suculentas, por lo tanto, su contenido de materia seca es bajo. Estas hierbas crecen en oquedades de la coraza, en las cuales se acumula pequeñas cantidades de materia orgánica y sus raíces suelen ser casi superficiales. Al igual que el grupo anterior, poseen hojas muy gruesas, las cuales se asocian con la regulación del calor y almacenamiento de agua (Arellano-Rivas et al., 2018; Grace, 2019). Su área foliar específica alta se asocia a un alto requerimiento de exposición a la luz solar, por lo tanto, se corrobora que son especies exigentes de luz (Poorter, 2009, Perez-Harguindeguy et al., 2013). *Trianthema portulacastrum* L. es una especie representativa de este grupo (Figura 27 F).

8.Hojas transformadas-cactáceas: El grupo representa la reducción máxima a la exposición a la radiación solar, sumado a la presencia de tallos suculentos y la vía fotosintética CAM (Metabolismo ácido de crasuláceas), la cual permite que se abran las estomas y se fije el CO₂ durante la noche, cuando la humedad relativa es alta y la temperatura foliar es baja, esta estrategia reduce drásticamente la pérdida de agua por transpiración (Tinoco-Ojanguren y Vázquez-Yanes, 1983). Una cactácea representativa de este grupo es *Opuntia inaperta* (Schott ex Griffiths) D.R.Hunt (Figura 27 G).

La diversidad de rasgos funcionales está poco estudiada en las selvas secas tropicales y, en consecuencia, no se comprende el valor de estos sistemas en el almacenamiento y producción de carbono, el ciclo del agua, el ciclo biogeoquímico, ni tampoco su resistencia y resiliencia al cambio climático (Pennington et al., 2018). Los coquinales, probablemente representen una subasociación

de la selva tropical seca con mayor diversidad funcional en la península de Yucatán, lo que lo hace único y con gran importancia ecológica (Aguilar-Canché et al., 2022).

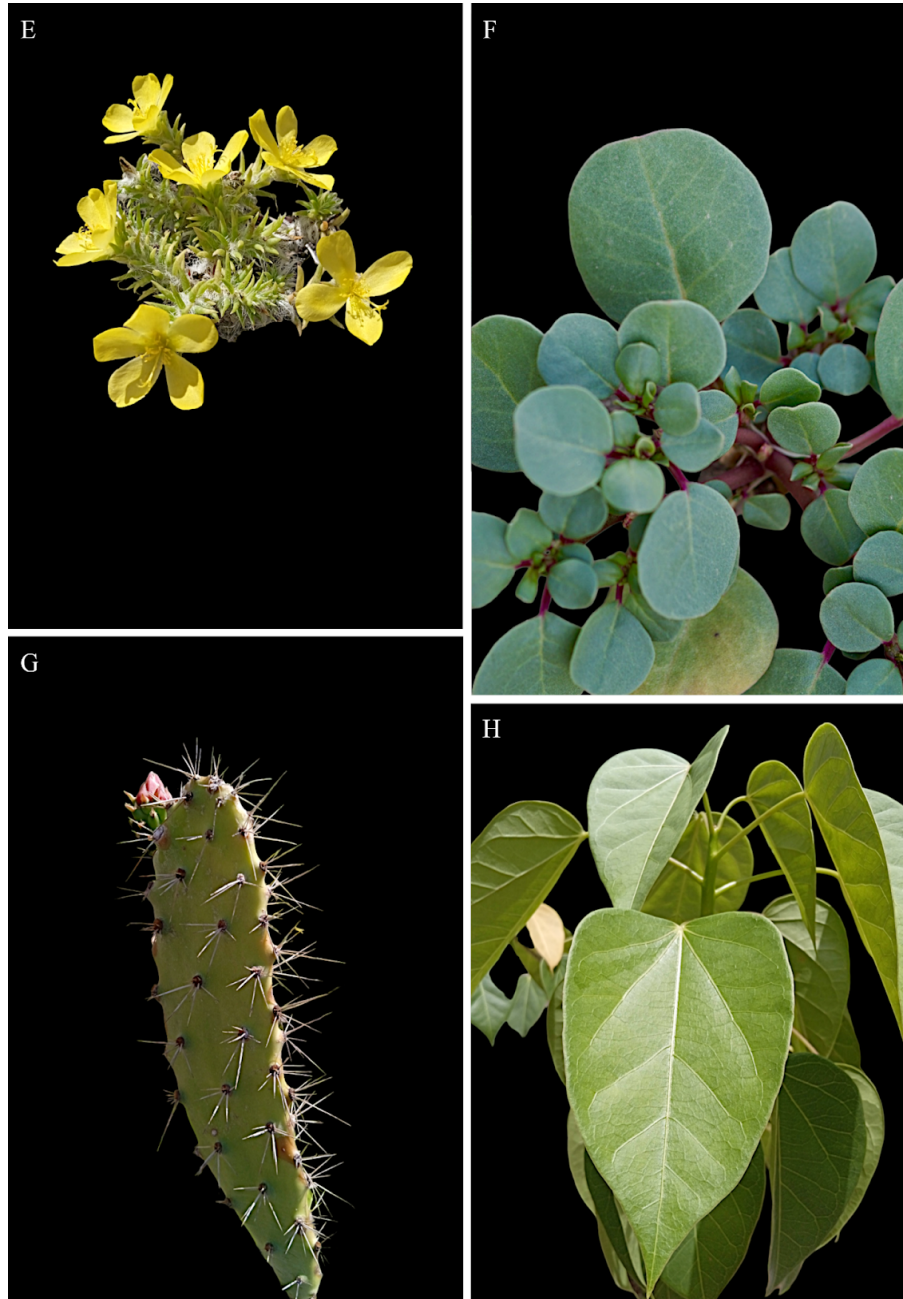


Figura 27. Especies representantes de los grupos funcionales.

Notas. **E.** *Portulaca rubricaulis* Kunth. **F.** *Trianthema portulacastrum* L. **G.** *Nopalea inaperta* A. Schott **H.** *Jatropha gaumeri* Greenm. Fotografías E., G. y H. Mayte Aguilar, F. Francisco Valdes.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El presente estudio sentó las bases para un mejor conocimiento de los coquinales de la península de Yucatán. Los resultados de diversidad taxonómica y funcional obtenidos en este estudio, representan una primera aproximación al entendimiento del ensamblaje y respuesta de las comunidades de plantas de los Coquinales al ambiente, sentando las bases para estudios más complejos. Con el registro de 147 taxones y 22 especies endémicas a la península de Yucatán, el coquinal estacionalmente inundado representa uno de los sistemas ecológicos con mayor diversidad funcional en las selvas secas de la península de Yucatán, lo que lo hace único y con gran importancia ecológica. Seguir realizando investigación en el coquinal estacionalmente inundado, nos permitirá seguir conociendo y generando información relevante, que permita en un futuro declararlo como área natural protegida.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar-Canché, M., Duno de Stefano, R. y Angulo, D. F. (2022). La diversidad funcional en el calichal yucateco: una estrategia que permite entender su riqueza desde una perspectiva ecológica. *Desde el Herbario CICY*, 14, 234-240.
- Aguilar-Canché, M., Can-Itzá, L., Duno de Stefano, R. y Angulo, D. F. (2024). ¡Uay! ¡qué calor! Estrategias funcionales de las plantas para sobrevivir al ambiente hostil del Coquinal Yucateco. *Desde el herbario CICY*, (en revisión).
- Ancona-Aragón, J. J., del Rocío Ruenes-Morales, M., Huchim-Herrera, J., Montañez-Escalante, P. I. y González-Iturbe, J. A. (2019). Woody species structure, diversity and floristic affinities in seasonally dry forest in the Uxmal archaeological zone [Estructura, diversidad y afinidades florísticas de las especies leñosas en el bosque estacionalmente seco de la zona arqueológica de Uxmal]. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 22(3), 755-767. <http://dx.doi.org/10.56369/tsaes.2666>
- Andermann, T., Antonelli, A., Barrett, R. L. y Silvestro, D. (2022). Estimating alpha, beta, and gamma diversity through deep learning [Estimación de la diversidad alfa, beta y gamma mediante aprendizaje profundo]. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1-14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.839407>
- Alberton, B., da Silva Torres, R., Freire Silva, S.T., da Rocha, H. R., Moura, M. S.B. y Cerdeira Morellato, L. P. (2019). Leafing patterns and drivers across seasonally dry tropical communities [Patrones de hojarasca e impulsores en comunidades tropicales estacionalmente secas]. *Remote Sensing*, 11(19), 1-21. <https://doi.org/10.3390/rs11192267>
- Arellano-Rivas, A., De-Nova, J. A. y Munguía-Rosas, M. A. (2018). Patch isolation and shape predict plant functional diversity in a naturally fragmented forest [El aislamiento y la forma

- de los parches predicen la diversidad funcional de las plantas en un bosque naturalmente fragmentado]. *Journal of Plant Ecology*, 11(1), 136-146.
<https://doi.org/10.1093/jpe/rtw119>
- Arriaga-Cabrera, L., Aguilar, V., Espinoza, J., Galindo, C., Herrmann, H., Santana, E., Graf, S., Pisanty, I. y Rosenzweig, L.(2009). Regiones prioritarias y planeación para la conservación de la biodiversidad. En *Capital natural de México: Estado de conservación y tendencias de cambio* (Vol. 2, pp. 433-457). CONABIO.
- Barragán, J. M., & De Andrés, M. (2015). Analysis and trends of the world's coastal cities and agglomerations [Análisis y tendencias de las ciudades y aglomeraciones costeras del mundo]. *Ocean & Coastal Management*, 114, 11-20.
<https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.06.004>
- Barringer, K. (2010). A new species of *Angelonia* (Plantaginaceae) from Mexico [Una nueva especie de *Angelonia* (Plantaginaceae) de México]. *Journal of the Botanical Research Institute of Texas*, 4(1), 51-54. <http://www.jstor.org/stable/41971968>
- Bautista, F., Leirana-Alcocer, J. Aguilar, Y., Delgado, C. y Frausto, O. (2017). El medio físico: Clima, geoformas, suelos y agua. En Ramos-Zapata, J., Parra-Tabla, V., Leirana-Alcocer, J., González-Moreno, A. y Chiappa-Carrara, X. (Eds), *Ecología funcional de la Reserva de la Biósfera Ría Lagartos* (pp. 21-40). SIIES-UADY-UNAM
- Becerra, J. X. (2005). Timing the origin and expansion of the Mexican tropical dry forest. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102(31), 10919-10923.
<https://doi.org/10.1073/pnas.0409127102>
- Belabed, S., Lotmani, B. y Romane, A. (2014). Assessment of metal pollution in soil and in vegetation near the wild garbage dumps at Mostaganem region [Evaluación de la contaminación por metales en el suelo y la vegetación cerca de los vertederos de basura

- silvestre en la región de Mostaganem]. *Journal of Materials and Environmental Sciences*, 5(5), 1551-1556.
- Brook, B. W., Sodhi, N. S. y Bradshaw, C. J. (2008). Synergies among extinction drivers under global change [Sinergias entre los factores de extinción bajo el cambio global]. *Trends in ecology & evolution*, 23(8), 453-460. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2008.03.011>
- Cach-Pérez, M. J., Andrade, J. L., Chilpa-Galván, N., Tamayo-Chim, M., Orellana, R. y Reyes-García, C. (2013). Climatic and structural factors influencing epiphytic bromeliad community assemblage along a gradient of water-limited environments in the Yucatan Peninsula, Mexico [Factores climáticos y estructurales que influyen en el ensamble de comunidades de bromelias epífitas a lo largo de un gradiente de ambientes de agua limitada en la Península de Yucatán, México]. *Tropical Conservation Science*, 6(2), 283-302. <https://doi.org/10.1177/194008291300600209>
- Cach-Pérez, M. J., Andrade, J. L. y Reyes-García, C. (2018). Morphophysiological plasticity in epiphytic bromeliads across a precipitation gradient in the Yucatan Peninsula, Mexico [Plasticidad morfofisiológica en bromeliáceas epífitas a través de un gradiente de precipitación en la Península de Yucatán, México]. *Tropical Conservation Science*, 11, 1-10. <https://doi.org/10.1177/1940082918781926>
- Campo, A. M., y Duval, V. S. (2014). Diversidad y valor de importancia para la conservación de la vegetación natural: Parque Nacional Lihué Calel (Argentina). *Anales de Geografía*, 34(2), 25-42. http://dx.doi.org/10.5209/rev_AGUC.2014.v34.n2.47071
- Castillo, R. J., Cervera, J. C. y Navarro-Alberto, J. (2016). Drought and extreme temperature tolerance for *Tillandsia dasyliriifolia*, an epiphytic bromeliad from the northern coastal dune scrubland in Yucatan, Mexico [Tolerancia a la sequía y a las temperaturas extremas

- de *Tillandsia dasyliriifolia*, una bromelia epífita del matorral de dunas costeras del norte de Yucatán, México]. *Botanical sciences*, 94(1), 121-126. <https://doi.org/10.17129/botsci.68>
- Carnevali, G., Tapia-Muñoz, J. L., Duno de Stefano, R. y Ramírez-Morillo, I. M. (2010a). Biodiversidad: ecosistemas y comunidades, Capítulo 4: Especies, Diversidad vegetal. En Durán, R. y Méndez, M. (Eds), *Biodiversidad y desarrollo humano en Yucatán* (pp. 175-178). CICY, PPDFMAM, CONABIO, SEDUMA. Mérida, Yucatán, México.
- Carnevali, G., Duno de Stefano, R., Tapia-Muñoz, J. L. y Ramírez-Morillo, I. M. (2010b). Reassessment of *Zephyranthes* (Amaryllidaceae) in the Yucatán Peninsula including a new species, *Z. orellanae* [Reevaluación de *Zephyranthes* (Amaryllidaceae) en la Península de Yucatán incluyendo una nueva especie, *Z. orellanae*]. *The Journal of the Torrey Botanical Society*, 137(1), 39-48. <https://doi.org/10.3159/08-RA-074.1>
- Carnevali, G., Trejo, J. C., Juárez, V., Duno de Stefano, R., Tapia-Muñoz, J. L., Ramírez-Morillo, I. M. y Cetzal-Ix, W., (2016). *Marsdenia calichicola* (Apocynaceae), a narrow endemic, endangered new species from the Mexican Yucatan Peninsula [*Marsdenia calichicola* (Apocynaceae), una nueva especie endémica y en peligro de extinción de la Península de Yucatán en México]. *Phytotaxa*, 270(2), 146-154. <https://doi.org/10.11646/phytotaxa.270.2.7>
- Carnevali, G., Ramírez-Morillo, I.M. , Pérez-Sarabia, J. E., Tapia-Muñoz, J. L., Medina, H. E., Cetzal-Ix, W., Hernández-Aguilar, S., Can-Itzá, L., Raigoza-Flores, N., Duno de Stefano, R. y Romero-González, G. A. (2021). Assessing the Risk of Extinction of Vascular Plants Endemic to the Yucatán Peninsula Biotic Province by Means of Distributional Data1 [Evaluación del Riesgo de Extinción de Plantas Vasculares Endémicas de la Provincia Biótica de la Península de Yucatán mediante Datos de Distribución1]. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 106(1), 424-457. <https://doi.org/10.3417/2021661>

- Carnevali, G., Duno de Stefano, R., Ramirez-Morillo, I. M., Allende, J., Barrios, Y. y Tapia-Muñoz, J. L. (2022a). *Heteranthera yucatanana* (Pontederiaceae), a new, threatened species from the Mexican Yucatan Peninsula [*Heteranthera yucatanana* (Pontederiaceae), una nueva especie amenazada de la península mexicana de Yucatán]. *Phytotaxa*, 547(1), 20-30. <https://doi.org/10.11646/phytotaxa.547.1.2>
- Carnevali, G., Duno de Stefano, R., Ramirez-Morillo, I. M., Barrios, J. y Tapia-Muñoz, J. L. (2022b). *Heteranthera yucatanana* (Pontederiaceae), una especie pequeña, hermosa, endémica... y amenazada. *Desde El Herbario CICY*, 14, 261-264.
- CONABIO (La Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad) (2022). *Biodiversidad mexicana*. Recuperado agosto 2022 de: https://www.biodiversidad.gob.mx/biodiversidad/que_es
- CONABIO e INEGI (La Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad e Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (2022). *División política estatal 1:250000*. Recuperado septiembre 2022 de: http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis_root/dipol/estata/dest22gw
- Contreras-Ramos, A. (2014). La sistemática: ruta histórica para conocer la biodiversidad. *Revista Digital Universitaria* 15(4), 1-11. <https://www.revista.unam.mx/vol.15/num4/art27/>
- Córdova-Tapia, F. y Zambrano, L. (2015). La diversidad funcional en la ecología de comunidades. *Ecosistemas*, 24(3), 78-87. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2015.24-3.10>
- Cornelissen, J. H., Lavorel, S., Garnier, E., Díaz, S., Buchmann, N., Gurvich, D. E., Reich P. B., Ter Steege, H., Morgan, H. D., Van Der Heijden, M. G.A., Pausas, J. G. y Poorter, H. (2003). A handbook of protocols for standardised and easy measurement of plant functional traits worldwide [Un manual de protocolos para una medición fácil y estandarizada de los

- rasgos funcionales de las plantas en todo el mundo]. *Australian journal of Botany*, 51(4), 335-380. <https://doi.org/10.1071/BT02124>
- Corella, F., Valdez Hernández, J. I., Cetina, V., González, F., Santos, A. y Aguirre, J. (2001). Estructura forestal de un bosque de mangles en el noreste del estado de Tabasco, México. *Revista Mexicana De Ciencias Forestales*, 26(90), 73-102. <http://cienciasforestales.inifap.gob.mx/index.php/forestales/article/view/914>.
- Correa, C. A., Etter, A., Díaz-Timoté, J., Rodríguez, S., Ramírez, W., y Corzo, G. (2020). Spatiotemporal evaluation of the human footprint in Colombia: Four decades of anthropic impact in highly biodiverse ecosystems [Evaluación espacio-temporal de la huella humana en Colombia: cuatro décadas de impacto antrópico en ecosistemas altamente biodiversos]. *Ecological Indicators*, 117, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106630>
- Cruz-Elizalde, R. y Ramírez-Bautista, A. (2012). Diversidad de reptiles en tres tipos de vegetación del estado de Hidalgo, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 83(2), 458-467. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2012.2.940>
- Curtis, J. T., y McIntosh, R. P. (1951). An upland forest continuum in the prairie-forest border region of Wisconsin [Una continuidad de los bosques de tierras altas en la región fronteriza entre praderas y bosques de Wisconsin]. *Ecology*, 32(3), 476-496. <http://www.jstor.org/stable/1931725>
- Delang, C. O. y Li, W. M. (2013). Species Richness and Diversity [Riqueza de especies y diversidad]. En *Ecological Succession on Fallowed Shifting Cultivation Fields* (pp. 39-66). Springer Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-007-5821-6_3
- Devictor, V., Mouillot, D., Meynard, C., Jiguet, F., Thuiller, W. y Mouquet, N. (2010). Spatial mismatch and congruence between taxonomic, phylogenetic and functional diversity: the need for integrative conservation strategies in a changing world [Desajuste espacial y

- congruencia entre la diversidad taxonómica, filogenética y funcional: la necesidad de estrategias de conservación integradoras en un mundo cambiante]. *Ecology letters*, 13(8), 1030-1040. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2010.01493.x>
- Dorsey, B. L., Haevermans, T., Aubriot, X., Morawetz, J. J., Riina, R., Steinmann, V. W. y Berry, P. E. (2013). Phylogenetics, morphological evolution, and classification of *Euphorbia* subgenus *Euphorbia* [Filogenética, evolución morfológica y clasificación de *Euphorbia* subgénero *Euphorbia*]. *Taxon*, 62(2), 291-315. <https://doi.org/10.12705/622.1>
- Duno de Stefano, R. (2017). El caliche yucateco, una vegetación compleja que falta por estudiar y definir. *Desde el Herbario CICY*, 9, 231-235.
- Duno de Stefano, R., Rico-Arce, L., Martínez-Bernal, A. y Gutiérrez-Báez, C. (2006). Notes on the Flora of the Yucatan Peninsula V: New records and miscellaneous notes for the family Leguminosae [Notas sobre la Flora de la Península de Yucatán V: Nuevos registros y notas misceláneas para la familia Leguminosae]. *Botanical Sciences*, 78, 43-46. <https://doi.org/10.17129/botsci.1720>
- Duno de Stefano, R., Carnevali Fernández-Concha, G., Ramírez Morillo, I. M., Tapia Muñoz, J. L., Can Itzá, L. L., Hernández-Aguilar, S. y Embray, T. (2010). Flora de la Península de Yucatán. Recuperado febrero 2024 de https://www.cicy.mx/sitios/flora%20digital/ficha_virtual.php?especie=1790
- Duno de Stefano, R., Aguilar-Canché, M., Carnevali Fernández-Concha, G., Ramírez-Morillo, I., Tapia-Muñoz J. L., Reyes-Palomeque, G. y Angulo, D. F. (2024). Seasonally flooded Coquinal: typifying a particular plant association in the northern Yucatan peninsula [Coquinal estacionalmente inundado: tipificación de una asociación vegetal particular en el norte de la península de Yucatán]. *Botanical sciences*, 102(2), 513-533. <https://doi.org/10.17129/botsci.3388>.

- Durán R. y Méndez M. (2021). *Resumen de la Biodiversidad y Desarrollo Humano en Yucatán* (pp. 2-3). CICY, PPD-FMAM, CONABIO, SEDUMA.
- Dzib-Castillo, B., Chanatásig-Vaca, C. y González-Valdivia, N. A. (2014). Estructura y composición en dos comunidades arbóreas de la selva baja caducifolia y mediana subcaducifolia en Campeche, México. *Revista mexicana de biodiversidad*, 85(1), 167-178. <https://doi.org/10.7550/rmb.38706>
- Elias, C., Fernandes, E., França, E., Bacchi, M. y Tagliaferro, F. (2008). Native bromeliads as biomonitors of airborne chemical elements in a Brazilian restinga forest [Bromeliáceas autóctonas como biomonitoros de elementos químicos transportados por el aire en un bosque de restinga brasileño]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 278(2), 423-427. <https://doi.org/10.1007/s10967-008-0813-5>
- Espadas-Manrique, C., Orellana R. y Reyes C. (2018). *Beaucarnea pliabilis*: y ahora ¿dónde voy a vivir?. *Desde El Herbario CICY*, 10, 103–109.
- Espadas-Manrique, C., Linares, M., Orellana, R., Peniche-Aké, S. y Reyes-García, C. (2020). Evaluación del riesgo de extinción de *Beaucarnea pliabilis* (Asparagaceae)(despeinada o tsiipil), especie endémica de la península de Yucatán. *Revista mexicana de biodiversidad*, 91, 1-18. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2020.91.3428>
- Espinosa, L., Ceron, M. y Sulub, Y. (1998) Limestone rocks of the Yucatan peninsula. Description of the lithology and physical properties based on the results of exploration, investigation and laboratory tests [Rocas calizas de la Península de Yucatán. Descripción de la litología y propiedades físicas con base en los resultados de exploración, investigación y pruebas de laboratorio]. *International Journal Rock Mechanics and Mining Sciences*, 35(4-5), 410–411. [https://doi.org/10.1016/S0148-9062\(98\)00147-8](https://doi.org/10.1016/S0148-9062(98)00147-8)

- Espinosa, C. I., Jara-Guerrero, A., Cisneros, R., Sotomayor, J. D. y Escribano-Ávila, G. (2016). Reserva Ecológica Arenillas; ¿un refugio de diversidad biológica o una isla de extinción?. *Ecosistemas*, 25(2), 5-12. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2016.25-2.02>
- Estrada-Medina, H., Graham, R. C., Allen, M. F., Jiménez-Osornio, J. J. y Robles-Casolco, S. (2013). The importance of limestone bedrock and dissolution karst features on tree root distribution in Northern Yucatán, México [La importancia de la roca madre caliza y las características kársticas de disolución en la distribución de las raíces de los árboles en el norte de Yucatán, Méxio]. *Plant and soil*, 362, 37-50. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1175-x>
- Estrada-Medina, H., Jiménez Osornio, J. J., Álvarez Rivera, O. y Barrientos Medina, R. C. (2019). El karst de Yucatán: su origen, morfología y biología. *Acta universitaria*, 29, 1-18. <https://doi.org/10.15174/au.2019.2292>
- Flores J. S. (1990) The Flowering Periods of Leguminosae in the Yucatan Peninsula in Relation to Honey Flows [Los periodos de floración de las leguminosas en la Península de Yucatán en relación con los flujos de miel]. *Journal of Apicultural Research*, 29(2), 82-88. <http://dx.doi.org/10.1080/00218839.1990.11101201>
- Flores, J. S. y Espejel I. (1994). Tipos de vegetación de la Península de Yucatán. *Etnoflora yucatanense* (p.135). Universidad Autónoma de Yucatán.
- Flores, J. S., Vermont-Ricalde, R. M. y Kantún-Balam, J. M. (2006). Leguminosae diversity in the Yucatan Peninsula and its importance for sheep and goat feeding [Diversidad de leguminosas en la Península de Yucatán y su importancia para la alimentación de ovinos y caprinos]. *BSAP Occasional Publication*, 34, 291-299. <https://doi.org/10.1017/S1463981500042497>

- Fuller, C., Ondei, S., Brook, B. W. y Buettel, J. C. (2019). First, do no harm: A systematic review of deforestation spillovers from protected areas [Primero, no hacer daño: Una revisión sistemática de los efectos indirectos de la deforestación en las áreas protegidas]. *Global Ecology and Conservation*, 18, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2019.e00591>
- Fuller, C., Ondei, S., Brook, B. W. y Buettel, J. C. (2020). Protected-area planning in the Brazilian Amazon should prioritize additionality and permanence, not leakage mitigation [La planificación de áreas protegidas en la Amazonia brasileña debe priorizar la adicionalidad y la permanencia, no la mitigación de fugas]. *Biological Conservation*, 248, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2020.108673>
- García, E. y CONABIO (La Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad) (1998a). *Precipitación total anual 1:1000000*. Recuperado septiembre 2022 de: http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis_root/clima/precip/isoyt1mgw
- García, E. y CONABIO (La Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad) (1998b). *Isotermas medias anuales 1:1000000*. Recuperado septiembre 2022 de: http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis_root/clima/temper/isotm1mgw
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen* (Serie Libros, No. 6), Instituto de Geografía, UNAM, México.
- Geldmann, J., Barnes, M., Coad, L., Craigie, I. D., Hockings, M. y Burgess, N. D. (2013). Effectiveness of terrestrial protected areas in reducing habitat loss and population declines [Eficacia de las áreas protegidas terrestres para reducir la pérdida de hábitats y el declive de las poblaciones.]. *Biological Conservation*, 161, 230-238. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2013.02.018>

- Gianoli, E. (2004). Plasticidad fenotípica adaptativa en plantas. En Marino Cabrera, H. (Ed), *Fisiología Ecológica en plantas: Mecanismos y Respuestas a Estrés en los ecosistemas*, (pp. 13-25). Departamento de Botánica, Universidad de Concepción, Casilla.
- González-Iturbe, J. A., Olmsted, I. y Tun-Dzul, F. (2002). Tropical dry forest recovery after long term Henequen (sisal, *Agave fourcroydes* Lem.) plantation in northern Yucatan, Mexico [Recuperación de la selva tropical seca tras la plantación a largo plazo de henequén (*Agave fourcroydes* Lem.) en el norte de Yucatán, México]. *Forest Ecology and Management*, 167(1-3), 67-82. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00689-2](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00689-2)
- González-Moreno, A. Delfín-González, H. y Bordera, S. (2017). Diversidad de insectos parasitoides: avispas Ichneumonidae. En Ramos-Zapata, J., Parra-Tabla, V., Leirana-Alcocer, J., González-Moreno, A. y Chiappa-Carrara, X. (Eds), *Ecología funcional de la Reserva de la Biósfera Ría Lagartos* (pp. 179-194). SIIES-UADY-UNAM.
- Gomes, A. L., Revermann, R., Meller, P., Goncalves, F. M., Aidar, M. P., Lages, F. y Finckh, M. (2021). Functional traits and symbiotic associations of geoxyles and trees explain the dominance of detarioid legumes in miombo ecosystems [Los rasgos funcionales y las asociaciones simbióticas de geoxilas y árboles explican el predominio de las leguminosas detarioideas en los ecosistemas de miombo]. *New Phytologist*, 230(2), 510-520. <https://doi.org/10.1111/nph.17168>
- Gorné, L. D., Díaz, S., Minden, V., Onoda, Y., Kramer, K., Muir, C., ... y Boenisch, G. (2022). The acquisitive–conservative axis of leaf trait variation emerges even in homogeneous environments [El eje adquisitivo-conservador de la variación de los rasgos foliares emerge incluso en ambientes homogéneos]. *Annals of Botany*, 129(6), 709-722. <https://doi.org/10.1093/aob/mcaa198>

- Grace, O. (2019). Succulent plant diversity as natural capital [La diversidad de plantas suculentas como capital natural]. *Plants, People, Planet*, 1(4), 336-345.
<https://doi.org/10.1002/ppp3.25>
- Graciano, C., Fernández, L. V. y Caldiz, D. O. (2003). *Tillandsia recurvata* L. as a bioindicator of sulfur atmospheric pollution [*Tillandsia recurvata* L. como bioindicador de contaminación atmosférica por azufre]. *Ecología Austral*, 13(1), 3-14.
http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1667-782X2003000100002&lng=es&tlng=en.
- Grüninger, W. y Velarde, M. (2015). Investigación con líquenes como indicadores de la contaminación y su aprovechamiento en la educación ambiental. *Revista Científica de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia*, 7(1), 34-40.
- Haahtela, T. (2019). A biodiversity hypothesis [Una hipótesis de la biodiversidad]. *Allergy*, 74(8), 1445-1456. <https://doi.org/10.1111/all.13763>
- Hamilton, A. J. (2005). Species diversity or biodiversity? [¿Diversidad de especies o biodiversidad?]. *Journal of environmental Management*, 75(1), 89-92.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2004.11.012>
- Hernández-Ramírez, A. M. y García-Méndez, S. (2015). Diversidad, estructura y regeneración de la selva tropical estacionalmente seca de la Península de Yucatán, México. *Revista de Biología Tropical*, 63(3), 603-616.
- Hernández, M. E., Ordoñez, M. de J. y Giménez, J. (2018). Análisis comparativo de dos sistemas de clasificación bioclimática aplicados en México. *Investigaciones geográficas*, (95).
<https://doi.org/10.14350/rig.57451>
- Herrera-Campos, de los A. M., Lücking, R., Pérez-Pérez, R. E., Miranda-González, R., Sánchez, N., Barcenás-Peña, A., Carrizosa, A., Zambrano, A., D. Ryam, B. y Nash III, T. H. (2014).

Biodiversidad de líquenes en México. Revista mexicana de biodiversidad, 85(1), 82-99.

<https://doi.org/10.7550/rmb.37003>

Izsák, J., & Pavoine, S. (2012). Links between the species abundance distribution and the shape of the corresponding rank abundance curve [Vínculos entre la distribución de la abundancia de especies y la forma de la curva de rango-abundancia correspondiente]. *Ecological indicators*, 14(1), 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.06.030>

Kougioumoutzis, K., Kokkoris, I. P., Panitsa, M., Kallimanis, A., Strid, A. y Dimopoulos, P. (2021). Plant endemism centres and biodiversity hotspots in Greece [Centros de endemismo vegetal y puntos críticos de biodiversidad en Grecia]. *Biology*, 10(2), 1-27. <https://doi.org/10.3390/biology10020072>

Krömer T., García-Franco J.G. y Toledo-Aceves T. (2014). Capítulo 29: Epífitas vasculares como bioindicadores de la calidad forestal: impacto antrópico sobre su diversidad y composición. En *Los bioindicadores ¿Guardianes de nuestro futuro ecológico?* (pp. 605-623) . Bogotá, Colombia.

Kronenfeld, B. J. y Wang, Y. C. (2007). Accounting for surveyor inconsistency and bias in estimation of tree density from presettlement land survey records [Contabilización de la incoherencia y el sesgo de los topógrafos en la estimación de la densidad arbórea a partir de registros topográficos anteriores al asentamiento]. *Canadian Journal of Forest Research*, 37(11), 2365-2379. <https://doi.org/10.1139/X07-068>

Jiménez Sierra, C. L., Sosa Ramírez, J., Cortés-Calva, P., Breceda Solís Cámara, A., Íñiguez Dávalos, L. I. y Ortega-Rubio, A. (2014). México país megadiverso y la relevancia de las áreas naturales protegidas. *Investigación y Ciencia*, 22(60), 16-22.

Jolliffe, I. T. y Cadima, J. (2016). Principal component analysis: a review and recent developments [Análisis de componentes principales: revisión y evolución reciente]. *Philosophical*

transactions of the royal society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 374(2065), 1-6. <https://doi.org/10.1098/rsta.2015.0202>

Jost, L. y González-Oreja, J. (2012). Midiendo la diversidad biológica: más allá del índice de Shannon. *Acta zoológica lilloana*, 56(1-2), 3-14. <https://www.researchgate.net/publication/230634099>

Lavorel, S. y Garnier, É. (2002). Predicting changes in community composition and ecosystem functioning from plant traits: revisiting the Holy Grail [Predicción de cambios en la composición de las comunidades y el funcionamiento de los ecosistemas a partir de los rasgos de las plantas: revisando el Santo Grial]. *Functional ecology*, 16(5), 545-556. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2435.2002.00664.x>

Leirana-Alcocer, J. L., Hernández-Betancourt, S., Salinas-Peba, L. y Guerrero-González, L. (2009). Cambios en la estructura y composición de la vegetación relacionados con los años de abandono de tierras agropecuarias en la selva baja caducifolia espinosa de la reserva de Dzilam, Yucatán. *Polibotánica*, (27), 53-70. Recuperado en de abril de 2024, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-27682009000100004&lng=es&tlng=es.

Leirana-Alcocer, J. L. y Bautista-Zúñiga, F. (2014). Patrones de asociación entre la cobertura vegetal y la calidad del suelo en el matorral costero de la reserva Ría Lagartos, Yucatán. *CienciaUAT*, 8(2), 44-53. Recuperado en febrero de 2024, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-78582014000200044&lng=es&tlng=es.

Leirana-Alcocer, J. L., Cervera-Herrera, J. C., Navarro-Alberto, J. A., y Barrientos-Medina, R. (2019). Diversidad, patrones de distribución y usos potenciales de Convolvulaceae: estrategia para mitigar la crisis alimentaria de abejas melíferas en los periodos críticos de

- floración en Campeche, México. En William Cetzal-Ix, W., Casanova-Lugo, F., Chay-Canul, A. y Martínez-Puc, J. (Eds), *Agroecosistemas Tropicales: Conservación De Recursos Naturales Y Seguridad Alimentaria* (pp. 176-182). Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Chiná-Instituto Tecnológico de la Zona Maya.
- Liao, H., Pal, R. W., Niinemets, Ü., Bahn, M., Cerabolini, B. E. y Peng, S. (2021). Different functional characteristics can explain different dimensions of plant invasion success [Diferentes características funcionales pueden explicar distintas dimensiones del éxito de la invasión vegetal]. *Journal of Ecology*, 109(3), 1524-1536. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13575>
- López-Angulo, J., Swenson, N. G., Cavieres, L. A. y Escudero, A. (2018). Interactions between abiotic gradients determine functional and phylogenetic diversity patterns in Mediterranean-type climate mountains in the Andes [Las interacciones entre gradientes abióticos determinan patrones de diversidad funcional y filogenética en montañas de clima mediterráneo en los Andes]. *Journal of Vegetation Science*, 29(2), 245-254. <https://doi.org/10.1111/jvs.12607>
- Lott, E. J. y Atkinson, T. H. (2010). Diversidad biológica, estructura y función: Diversidad florística. En Ceballos, G., Martínez, L., García, A., Espinoza, E. y Bezaury, J. (Eds), *Diversidad, amenazas y áreas prioritarias para la conservación de las selvas secas del Pacífico de México* (pp. 387-392). Fondo de Cultura Económica y Comisión Nacional para el Fomento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO).
- Lozano-Peña, S., Vásquez-Moscoso, C. A., Rivera-Rondon, C. A., Zapata, A. M., y Ortiz-Moreno, M. L. (2019). Efecto de la vegetación riparia sobre el fitoperifiton de humedales en la Orinoquía colombiana. *Acta biológica colombiana*, 24(1), 67-85. <https://doi.org/10.15446/abc.v24n1.69086>

- Llorente-Bousquets, J. y Ocegueda, S. (2008). Estado del conocimiento de la biota. En *Capital natural de México, Conocimiento actual de la biodiversidad* (pp. 283-322). CONABIO.
- Luna-Vega, I., Alcántara, A.O., Contreras-Medina, R. y Ponce-Vargas, A. (2006). Biogeography, current knowledge and conservation of threatened vascular plants characteristic of Mexican temperate forests [Biogeografía, conocimiento actual y conservación de plantas vasculares amenazadas características de los bosques templados mexicanos]. *Biodivers Conserv* 15, 3773–3799. <https://doi.org/10.1007/s10531-005-5401-1>
- Luna-Vega, I. y Contreras-Medina, R. (2010). Plant biodiversity hotspots and biogeographic methods [Puntos críticos de biodiversidad vegetal y métodos biogeográficos]. En Rescigno V., Maletta S. (Eds), *Biodiversity hotspots* (pp. 181-191). Nova-Science Publishers.
- Luna-Vega I., Espinosa D., Rivas G.T. y Contreras-Medina R. (2013) Geographical patterns and determinants of species richness in Mexico across selected families of vascular plants: implications for conservation [Patrones geográficos y determinantes de la riqueza de especies en México en familias seleccionadas de plantas vasculares: implicaciones para la conservación]. *Systematics and Biodiversity*, 11(2), 237-256. <https://doi.org/10.1080/14772000.2013.797517>
- Ma, J., Niklas, K. J., Liu, L., Fang, Z., Li, Y. y Shi, P. (2022). Tree size influences leaf shape but does not affect the proportional relationship between leaf area and the product of length and width [El tamaño del árbol influye en la forma de la hoja, pero no afecta a la relación proporcional entre el área foliar y el producto de la longitud y la anchura]. *Frontiers in plant science*, 13, 1-10. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.850203>
- MacArthur, R. H. (1957). On the relative abundance of bird species [Sobre la abundancia relativa de las especies de aves]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 43(3), 293-295. <https://doi.org/10.1073/pnas.43.3.29>

- Malhado, A. C., Whittaker, R. J., Malhi, Y., Ladle, R. J., Ter Steege, H., Phillips, O., Aragão, L., Baker, T., Arroyo, L., Almeida, S., Higuchi, N., Killen, T., Monteagudo, A., Pitman, L., Prieto, A., Salomão, R., Vásquez-Martínez, R., Laurance, W. y Ramírez-Angulo, H. (2010). Are compound leaves an adaptation to seasonal drought or to rapid growth? Evidence from the Amazon rain forest [¿Las hojas compuestas son una adaptación a la sequía estacional o al crecimiento rápido? Evidencia de la selva amazónica]. *Global Ecology and Biogeography*, 19(6), 852-862. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00567.x>
- Mammola, S., Carmona, C. P., Guillerme, T., y Cardoso, P. (2021). Concepts and applications in functional diversity [Conceptos y aplicaciones de la diversidad funcional]. *Functional Ecology*, 35(9), 1869-1885. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.13882>
- Márdero, S., Nickl, E., Schmook, B., Schneider, L., Rogan, J., Christman, Z. y Lawrence, D. (2012). Sequías en el sur de la península de Yucatán: análisis de la variabilidad anual y estacional de la precipitación. *Investigaciones geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, (78), 19-33. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112012000200003&lng=es&tlng=es
- Marshall, J., Donohoe, A., Ferreira, D. y McGee, D. (2014). The ocean's role in setting the mean position of the Inter-Tropical Convergence Zone [El papel del océano en la determinación de la posición media de la Zona de Convergencia Intertropical]. *Climate Dynamics*, 42, 1967-1979. <https://doi.org/10.1007/s00382-013-1767-z>
- Martínez Gordillo, M. y Espinosa Matías, S. (2005). Tricomas foliares de *Croton* sección Barhamia (Euphorbiaceae). *Acta botánica mexicana*, (72), 39-51. <https://doi.org/10.21829/abm72.2005.1000>

- Martínez-Antúnez, P., Wehenkel, C., Hernández-Díaz, J. C., Gonzalez-Elizondo, M., Corral-Rivas, J. J. y Pinedo-Álvarez, A. (2013). Effect of climate and physiography on the density of tree and shrub species in Northwest Mexico [Efecto del clima y fisiografía sobre la densidad de especies arbóreas y arbustivas en el Noroeste de México]. *Polish Journal of Ecology*, 61(2), 283-295.
- https://www.researchgate.net/publication/249963406_Effect_of_climate_and_physiography_on_the_density_of_tree_and_shrub_species_in_Northwest_Mexico
- Miranda F. (1958). Rasgos fisiográficos de interés para estudios botánicos. En Beltrán E. (Ed.), *Los Recursos Naturales del Sureste y su Aprovechamiento* (t. 2, pp. 215-271). Instituto Mexicano Recursos Naturales Renovables.
- Miranda-Samper, O., Martínez, R. F. O., Salas, A. R., Mancilla, Y. F. y Ibarguen, J. C. (2023). Impacto ambiental del botadero de residuos sólidos a cielo abierto en el corregimiento de córdoba Departamento del Valle del Cauca. *Ingeniería e Innovación*, 11(1), 5-5.
- Molina Ruiz, J. y Tudela Serrano, M. L. (2006). Identificación de impactos ambientales significativos en la implantación de Parques Eólicos. Un ejemplo en el municipio de Jumilla (Murcia). *Investigaciones Geográficas* (Esp), (41), 145-154.
- <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=17604109>
- Mondragón-Chaparro, D., Ramírez-Morillo, I., Flores-Cruz, M., y García-Franco, J. (2011). *La familia bromeliaceae en México* (pp. 15-34). SAGARPA, Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, SNICS, SINAREFI, Sistema Nacional de Recursos Filogenéticos para la Alimentación y la Agricultura.
- Moreno, C. E. (2001). *Métodos para medir la biodiversidad, Manuales y tesis SEA* (pp. 17-53). Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED), Oficina

Regional de Ciencia y Tecnología para América Latina y el Caribe (ORCYT), UNESCO y Sociedad Entomológica Aragonesa (SEA).

Morrone, J. J., Escalante, T. y Rodríguez-Tapia, G. (2017). Mexican biogeographic provinces: Map and shapefiles [Provincias biogeográficas mexicanas: Mapa y shapefiles]. *Zootaxa*, 4277(2), 277-279. <https://doi.org/10.11646/zootaxa.4277.2.8>

Morrone, J. J. (2019). Regionalización biogeográfica y evolución biótica de México: encrucijada de la biodiversidad del Nuevo Mundo. *Revista mexicana de biodiversidad*, 90.

Mouchet, M. A., Villéger, S., Mason, N. W., y Mouillot, D. (2010). Functional diversity measures: an overview of their redundancy and their ability to discriminate community assembly rules [Medidas de diversidad funcional: una visión general de su redundancia y su capacidad para discriminar las reglas de reunión de las comunidades]. *Functional Ecology*, 24(4), 867-876. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2010.01695.x>

Moura, M. D. N. y Vitorino, M. I. (2012). Variabilidade da precipitação em tempo e espaço associada à Zona de Convergência Intertropical [Variabilidad de las precipitaciones en el tiempo y el espacio asociada a la Zona de Convergencia Intertropical]. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 27(4), 475-483. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862012000400010>

Munguía-Rosas, M. A., Jurado-Dzib, S. G., Mezeta-Cob, C. R., Montiel, S., Rojas, A. y Pech-Canché, J. M. (2014). Continuous forest has greater taxonomic, functional and phylogenetic plant diversity than an adjacent naturally fragmented forest [El bosque continuo presenta una mayor diversidad taxonómica, funcional y filogenética de plantas que un bosque adyacente fragmentado de forma natural]. *Journal of Tropical Ecology*, 30(4), 323-333. <https://doi.org/10.1017/S0266467414000194>

Munguía-Rosas, M. A., Angulo, D. F., Arceo-Gómez, G. y Parra-Tabla, V. (2019). Variation in leaf traits across a precipitation gradient in coastal sand dunes in Yucatan Peninsula

- [Variación de rasgos foliares a través de un gradiente de precipitación en dunas costeras de la Península de Yucatán]. *Journal of Arid Environments*, 162, 10-17. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2018.12.001>
- Murguía-Romero, M., Ortiz, E., Serrano-Estrada, B., & Villaseñor, J. L. (2023). The Kew's "World Checklist of Vascular Plants" and its relevance to the knowledge of the flora of Mexico. *Botanical Sciences*, 101(2), 632-653. <https://doi.org/10.17129/botsci.3223>
- Nielsen, F. (2016). Hierarchical clustering [Agrupamiento jerárquico]. En *Introduction to HPC with MPI for Data Science* (pp. 195-211). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-21903-5>
- Niklas, K. J., Shi, P., Gielis, J., Schrader, J. y Niinemets, Ü. (2023). Leaf functional traits: Ecological and evolutionary implications [Rasgos funcionales de la hoja: Implicaciones ecológicas y evolutivas]. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1-5. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1169558>
- Ochoa-Gaona, S., Hernández-Vázquez, F., De Jong, B. H. J. y Gurri-García, F. D. (2007). Pérdida de diversidad florística ante un gradiente de intensificación del sistema agrícola de Roza-tumba-quema: un estudio de caso en la Selva lacandona, chiapas, México. *Botanical Sciences*, (81), 65-80. <https://doi.org/10.17129/botsci.1766>
- Ochoa-Jiménez, D. A., Cueva-Agila, A., Prieto, M., Aragón, G. y Benitez, Á. (2015). Cambios en la composición de líquenes epífitos relacionados con la calidad del aire en la ciudad de Loja (Ecuador). *Caldasia*, 37(2), 333-343. <http://dx.doi.org/10.15446/caldasia.v37n2.53867>
- Oliveira, A. C. P. D., Nunes, A., Oliveira, M. A., Rodrigues, R. G. y Branquinho, C. (2022). How Do Taxonomic and Functional Diversity Metrics Change Along an Aridity Gradient in a Tropical Dry Forest? [¿Cómo cambian las métricas de diversidad taxonómica y funcional

- a lo largo de un gradiente de aridez en un bosque tropical seco?]. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1-9. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.923219>
- Orellana R., Islebe G. y Espadas C. (2003). Presente, pasado y futuro de los climas de la Península de Yucatán. En Colunga, M. y Larqué A. (Eds), *Naturaleza y Sociedad del Área maya. Pasado Presente y Futuro* (pp. 37-52). Academia Mexicana de Ciencias y Centro de Investigación Científica de Yucatán.
- Orellana R., Espadas, C., Nava, F., Conde, C. y Gay, C. (2010). Escenarios horizonte 2020. En *Atlas Escenarios del cambio climático en la Península de Yucatán* (pp. 1-113). CICY, SIIDETEX, FOMIX, SEDUMA, PNUD.
- Orellana R., Espadas, C. y Nava F. (2014). V. Clima. En Euán J., García de Fuentes, A., Liceaga M., Munguía A. (Eds), *La costa de Yucatán, un espacio de reflexión sobre la relación sociedad-naturaleza, en el contexto de su ordenamiento ecológico territorial* (pp.115-123). CINVESTAV-UADY, CICY.
- Ortiz-Medina, J. A., Peña-Peniche, A. y Chablé-Santos, J. (2022). Diversidad de anfibios y reptiles en cuatro tipos de vegetación de la Reserva de la Biosfera Ría Lagartos, México. *Revista latinoamericana de herpetología*, 5(4), 16-32. <https://doi.org/10.22201/fc.25942158e.2022.4.435>
- Parra-Tabla, V., Albor-Pinto, C., Tun-Garrido, J., Angulo-Pérez, D., Barajas, C., Silveira, R., Ortiz-Díaz, J. y Arceo-Gómez, G. (2018). Spatial patterns of species diversity in sand dune plant communities in Yucatan, Mexico: importance of invasive species for species dominance patterns [Patrones espaciales de diversidad de especies en comunidades de plantas de dunas de arena en Yucatán, México: importancia de las especies invasoras para los patrones de dominancia de especies]. *Plant Ecology & Diversity*, 11(2), 157-172. <https://doi.org/10.1080/17550874.2018.1455232>

- Pennington, R. T., Lehmann, C. E. y Rowland, L. M. (2018). Tropical savannas and dry forests [Sabanas tropicales y bosques secos]. *Current Biology*, 28(9), R541-R545. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2018.03.014>
- Perea, A. J., Garrido, J. L. y Alcántara, J. M. (2021). Plant functional traits involved in the assembly of canopy–recruit interactions [Rasgos funcionales de la planta implicados en el ensamblaje de las interacciones dosel-recluta]. *Journal of Vegetation Science*, 32(1), 1-12. <https://doi.org/10.1111/jvs.12991>
- Perez-Harguindeguy, N., Diaz, S., Garnier, E., Lavorel, S., Poorter, H., Jaureguiberry, P., Bret-Harte, M., Cornwell, W., Craine, J., Gurvich, D., Urcelay, C., Veneklaas, E., Reich, P., Poorter, L., Wright, I., Ray, P., Enrico, L., Pausas, J., de Vos, A., ... y Cornelissen, J. H. C. (2013). New handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide [Nuevo manual para la medición estandarizada de rasgos funcionales de plantas en todo el mundo]. *Australian Journal of Botany*, 61(3), 167–234. <https://doi.org/10.1071/BT12225>
- Pérez-Sarabia, J. E. y Duno de Stefano R. (2015). Patrones de distribución de la flora endémica de la Península de Yucatán. *Desde el Herbario CICY*, 7, 76-80
- Pérez-Sarabia, J. E., Duno de Stefano, R., Carnevali Fernández-Concha, G., Ramírez Morillo, I., Méndez-Jiménez, N., Zamora-Crescencio, P., Gutiérrez-Báez, C. y Cetzal-Ix, W. (2017). El conocimiento florístico de la Península de Yucatán, México. *Polibotánica*, 44(22), 39-49. <https://doi.org/10.18387/polibotanica.44.3>
- Petchey, O. L. y Gaston, K. J. (2002). Functional diversity (FD), species richness and community composition [Diversidad funcional (DF), riqueza de especies y composición de las comunidades]. *Ecology letters*, 5(3), 402-411. <https://doi.org/10.1046/j.1461-0248.2002.00339.x>

- Petchey, O. L. y Gaston, K. J. (2006). Functional diversity: back to basics and looking forward [Diversidad funcional: volver a lo básico y mirar hacia el futuro]. *Ecology letters*, 9(6), 741-758. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2006.00924.x>
- Piza, I. C., Jarrín, I. C. y Angulo, J. C. (2020). El impacto ambiental que ocasiona el basurero a cielo abierto en el recinto La Hernestina del cantón Montalvo. *Uniandes Episteme. Revista de Ciencia, Tecnología e Innovación.*, 7, 643-654. <https://revista.uniandes.edu.ec/ojs/index.php/EPISTEME/article/view/2107>
- Pla, L. (2006). Biodiversidad: Inferencia basada en el índice de Shannon y la riqueza. *Interciencia*, 31(8), 583-590. https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442006000800008
- Poorter, L. (2009). Leaf traits show different relationships with shade tolerance in moist versus dry tropical forests [Los rasgos foliares muestran diferentes relaciones con la tolerancia a la sombra en bosques tropicales húmedos y secos]. *New phytologist*, 181(4), 890-900. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02715.x>
- Ramírez-Morán, N. A., León-Gómez, M. y Lücking, R. (2016). Uso de biotipos de líquenes como bioindicadores de perturbación en fragmentos de Bosque Altoandino (Reserva Biológica "Encenillo", Colombia). *Caldasia*, 38(1), 31-52. <https://doi.org/10.15446/caldasia.v38n1.57821>
- Ramírez-Morillo I. (2019). La flora de la Península de Yucatán: ¿diversa? ¿bien conocida? ¿protegida? no, no y¿no?. *Desde el Herbario CICY*, 11, 130-137.
- Reyes-García, C., Pereira-Zaldívar, N., Espadas-Manrique, C., Tamayo-Chim, M., Chilpa-Galván, N., Cach-Pérez, M., Ramírez-Medina, M., Benavides, A., Hietz, P., Zotz, G., Andrade, J., Cardelús, C., de Paula, R., Einzmann, H., Guzmán, V., Krömer, T., Pinzón, J., Sarmiento, J., Wanek, W., ... y Woods, C. (2022). New Proposal of Epiphytic Bromeliaceae Functional

- Groups to Include Nebulophytes and Shallow Tanks [Nueva propuesta de grupos funcionales de Bromeliaceae epifitas para incluir nebulófitos y tanques poco profundos]. *Plants*, 11(22), 1-24. <https://doi.org/10.3390/plants11223151>
- Rivera-Martínez R. (2020). Diversidad filogenética: una forma de medir la historia evolutiva de la biodiversidad. *Desde el Herbario CICY*, 12, 270–275
- Rivera, P., Villaseñor, J. L., Terrazas, T. y Panero, J. L. (2020). The importance of the Mexican taxa of Asteraceae in the family phylogeny [La importancia de los taxones mexicanos de Asteraceae en la filogenia de la familia]. *Journal of Systematics and Evolution*, 59(5), 935-952. <https://doi.org/10.1111/jse.12681>
- Rocchini, D. y Neteler, M. (2012). Spectral rank–abundance for measuring landscape diversity [Rango espectral: abundancia para medir la diversidad del paisaje]. *International Journal of Remote Sensing*, 33(14), 4458-4470. <https://doi.org/10.1080/01431161.2011.648286>
- Rodríguez-Alarcón, S. J., Pinzón-Pérez, L., López-Cruz, J. y Cabrera-Amaya, D. (2020). Rasgos funcionales de plantas leñosas en áreas verdes de Bogotá, Colombia. *Biota colombiana*, 21(2), 108-133. <https://doi.org/10.21068/c2020.v21n02a08>
- Romero-Soler, K. J. (2021). Entre campanas y colores: sobre las especies de *Ipomoea* (Convolvulaceae) en la Península de Yucatán, México. *Desde El Herbario CICY*, 13, 12–18.
- Rudd, V. E. (1968). Leguminosae of Mexico — Faboideae: I. Sophoreae and Podalyrieae [Leguminosae de México - Faboideae: I. Sophoreae y Podalyrieae]. *Rhodora*, 70(784), 492–532. <http://www.jstor.org/stable/23311712>
- Rzedowski, J., y Huerta, L. (1978). Capítulo 9 Tipos de vegetación. En *Vegetación de México* (Vol. 432, pp. 160-168). Editorial Limusa., S. A.

- Rzedowski, J. (1991). El endemismo en la flora fanerogámica mexicana: una apreciación analítica preliminar. *Acta Botánica Mexicana*, (15), 47-64.
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57401505>
- Sánchez Gutiérrez, F., Pérez-Flores, J., Obrador Olan, J. J., Sol Sánchez, Á. y Ruiz-Rosado, O. (2016). Estructura arbórea del sistema agroforestal cacao en Cárdenas, Tabasco, México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 7(SPE14), 2695-2709.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=263144474005>
- Sandoval-Granillo, V. y Meave, J. A. (2023). Leaf functional diversity and environmental filtering in a tropical dry forest: Comparison between two geological substrates [Diversidad funcional foliar y filtrado ambiental en un bosque seco tropical: Comparación entre dos sustratos geológicos]. *Ecology and Evolution*, 13(9), 1-17.
<https://doi.org/10.1002/ece3.10491>
- Shen, J. W., Long, J. P., Pedroja, K., Yang, H. Q., Xu, H. L. y Sun, J. L. (2013). Holocene coquina beachrock from Haishan Island, east coast of Guangdong Province, China [Roca playera de coquina holocena de la isla Haishan, costa este de la provincia de Guangdong, China]. *Quaternary International*, 310, 199-212. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2013.05.011>
- Shreve, F. y Mallery, T. D. (1933). The relation of caliche to desert plants [La relación del caliche con las plantas del desierto]. *Soil Science* 35(2), 99-114. <https://doi.org/10.1097/00010694-193302000-00002>
- SMN-CONAGUA (Servicio Meteorológico Nacional-Comisión Nacional del Agua). (2022). *Precipitación y temperatura de Yucatán. México*. Recuperado abril 2024 de www.smn.conagua.gob.mx
- Soler, P., Berroterán, J., Gil, J. y Acosta, R. (2012). Índice valor de importancia, diversidad y similaridad florística de especies leñosas en tres ecosistemas de los llanos centrales de

<https://www.researchgate.net/publication/290436874>

Srivastava, D. S., Cadotte, M. W., MacDonald, A. A. M., Marushia, R. G. y Mirotchnick, N. (2012). Phylogenetic diversity and the functioning of ecosystems [Diversidad filogenética y funcionamiento de los ecosistemas]. *Ecology letters*, 15(7), 637-648. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2012.01795.x>

Steinmann, V. W., (2002). Diversidad y endemismo de la familia Euphorbiaceae en México. *Acta Botanica Mexicana*, (61), 61-93. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57406107>

Steinmann, V. W. y Porter, J. M. (2002). Phylogenetic relationships in Euphorbieae (Euphorbiaceae) based on ITS and ndhF sequence data [Relaciones filogenéticas en Euphorbieae (Euphorbiaceae) basadas en datos de secuencia ITS y ndhF]. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 453-490. <https://doi.org/10.2307/3298591>

Su, Y., Cui, B., Luo, Y., Wang, J., Wang, X., Ouyang, Z. y Wang, X. (2021). Leaf functional traits vary in urban environments: influences of leaf age, land-use type, and urban–rural gradient [Los rasgos funcionales de las hojas varían en ambientes urbanos: influencias de la edad de las hojas, el tipo de uso del suelo y el gradiente urbano-rural]. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 9, 1-14. <https://doi.org/10.3389/fevo.2021.681959>

Suárez-Castro, A. F., Raymundo, M., Bimler, M. y Mayfield, M. M. (2022). Using multi-scale spatially explicit frameworks to understand the relationship between functional diversity and species richness [Uso de marcos espacialmente explícitos de múltiples escalas para comprender la relación entre la diversidad funcional y la riqueza de especies]. *Ecography*, 2022(6), 1-18. <https://doi.org/10.1111/ecog.05844>

- Suzuki, R. y Shimodaira, H. (2006). Pvcust: an R package for assessing the uncertainty in hierarchical clustering [Pvcust: un paquete R para evaluar la incertidumbre en agrupaciones jerárquicas]. *Bioinformatics*, 22(12): 1540-1542.
- Suzuki, R., Terada, Y. y Shimodaira, H. (2019). Hierarchical Clustering with P-Values via Multiscale Bootstrap Resampling [H. Agrupación jerárquica con valores P mediante remuestreo de arranque multiescala]. Recuperado en noviembre de 2023, de <https://cran.r-project.org/web/packages/pvcust/pvcust.pdf>
- Swenson N. G. (2011). The role of evolutionary processes in producing biodiversity patterns, and the interrelationships between taxonomic, functional and phylogenetic biodiversity [El papel de los procesos evolutivos en la producción de patrones de biodiversidad y las interrelaciones entre la biodiversidad taxonómica, funcional y filogenética]. *American journal of botany*, 98(3), 472–480. <https://doi.org/10.3732/ajb.1000289>
- Tapia-Muñoz, J. L. (2011). La familia Convolvulaceae en la Península de Yucatán. *Desde el Herbario CICY*, 3, 54-55.
- Thiers B. (2023). *Index Herbariorum. Part I: The herbaria of the world*. New York Botanical Garden. Recuperado abril 2024 de <https://www.sweetgum.nybg.org/ih>
- Tinoco-Ojanguren, C. y Vázquez-Yanes, C. (1983). Especies CAM en las selva húmeda de los Tuxtles, Ver. *Botanical Sciences*, (45), 150-153. <https://doi.org/10.17129/botsci.1309>
- Torrescano-Valle N. y Folan W.J. (2015). Physical Settings, Environmental History with an Outlook on Global Change [Entornos físicos, historia ambiental con una perspectiva del cambio global]. En Schmook, B., Calmé, S., León-Cortés, J. L. e Islebe, G. A. (Eds.), *Biodiversity and Conservation of the Yucatán Peninsula* (pp. 9-37). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-06529-8>

- Vačkář, D., Harmáčková, Z. V., Kaňková, H. y Stupková, K. (2016). Human transformation of ecosystems: comparing protected and unprotected areas with natural baselines [Transformación humana de los ecosistemas: comparación de zonas protegidas y no protegidas con líneas de base naturales]. *Ecological indicators*, 66, 321-328. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.02.001>
- Valbuena, R., Packalén, P., Martí, S. y Maltamo, M. (2012). Diversity and equitability ordering profiles applied to study forest structure [Perfiles de ordenación de la diversidad y la equitatividad aplicados al estudio de la estructura forestal]. *Forest Ecology and Management*, 276, 185-195. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.03.036>
- Vázquez, D. P. y Simberloff, D. (2002). Ecological specialization and susceptibility to disturbance: conjectures and refutations [Especialización ecológica y susceptibilidad a las perturbaciones: conjeturas y refutaciones]. *The American Naturalist*, 159(6), 606-623. <https://doi.org/10.1086/339991>
- Velásquez, R., Bello, J., Prieto, A. y García, J. (2012). Composición florística y estructura comunitaria de un arbustal xerófilo en la localidad de Punta de Araya, Península de Araya, estado Sucre, Venezuela. *Boletín del Centro de Investigaciones Biológicas*, 46(2), 95-119. https://www.researchgate.net/publication/335277608_COMPOSICION_FLORISTICA_Y_ESTRUCTURA_COMUNITARIA_DE_UN_ARBUSTAL_XEROFILO_EN_LA_LOCALIDAD_DE_PUNTA_DE_ARAYA_PENINSULA_DE_ARAYA_ESTADO_SUCRE_VENEZUELA
- Villaseñor, J. L., (2004). Los géneros de plantas vasculares de la flora de México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, (75), 105-135. <https://doi.org/10.17129/botsoci.1694>

- Villaseñor, J. L., (2016). Checklist of the native vascular plants of Mexico [Lista de las plantas vasculares nativas de México]. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 87(3), 559-902.
<https://doi.org/10.1016/j.rmb.2016.06.017>
- Villaseñor, J. L. y Meave, J. A. (2022). Floristics in Mexico today: insights into a better understanding of biodiversity in a megadiverse country [La florística en México en la actualidad: perspectivas para una mejor comprensión de la biodiversidad en un país megadiverso]. *Botanical Sciences*, 100(Special), S14-S33.
<https://doi.org/10.17129/botsci.3050>
- Villéger, S., Miranda, J. R., Hernández, D. F. y Mouillot, D. (2010). Contrasting changes in taxonomic vs functional diversity of tropical fish communities after habitat degradation [Cambios contrastantes en la diversidad taxonómica vs funcional de las comunidades de peces tropicales después de la degradación del habitat]. *Ecological applications*, 20(6), 1512-1522. <https://doi.org/10.1890/09-1310.1>
- WCVP (2022). World Checklist of Vascular Plants, version 8.0. The Royal Botanic Gardens, Kew.
Recuperado en mayo de 2024, de <https://powo.science.kew.org/>
- Weiss, K. C. y Ray, C. A. (2019). Unifying functional trait approaches to understand the assemblage of ecological communities: synthesizing taxonomic divides [Unificar los enfoques de los rasgos funcionales para comprender el ensamblaje de las comunidades ecológicas: sintetizar las divisiones taxonómicas]. *Ecography*, 42(12), 2012-2020.
<https://doi.org/10.1111/ecog.04387>
- Willis, A. D. (2019). Rarefaction, alpha diversity, and statistics [Rarefacción, diversidad alfa y estadísticas]. *Frontiers in microbiology*, 10(2407), 1-5.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.02407>

- Winter, M., Devictor, V. y Schweiger, O. (2013). Phylogenetic diversity and nature conservation: where are we? [Diversidad filogenética y conservación de la naturaleza: ¿dónde estamos?]. *Trends in ecology & evolution*, 28(4), 199-204. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2012.10.015>
- White, D. A. y Hood, C. S. (2004). Vegetation patterns and environmental gradients in tropical dry forests of the northern Yucatan Peninsula [Patrones de vegetación y gradientes ambientales en los bosques secos tropicales del norte de la Península de Yucatán]. *Journal of Vegetation Science*, 15(2), 151-160. <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2004.tb02250.x>
- Whittaker, R. H. (1972). Evolution and measurement of species diversity [Evolución y medición de la diversidad de especies]. *Taxon*, 21(2-3), 213-251. <https://doi.org/10.2307/1218190>
- Wolf, C., Levi, T., Ripple, W. J., Zárrate-Charry, D. A. y Betts, M. G. (2021). A forest loss report card for the world's protected areas [Un informe sobre la pérdida de bosques para las áreas protegidas del mundo]. *Nature ecology & evolution*, 5(4), 520-529. <https://doi.org/10.1038/s41559-021-01389-0>
- Zamora-Crescencio, P., García Gil, G., Flores-Guido, J. S. y Ortiz, J. J. (2008). Estructura y composición florística de la selva mediana subcaducifolia en el sur del estado de Yucatán, México. *Polibotánica*, 26(13), 39-66. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-27682008000200002&lng=es&tlng=es.
- Zamora-Crescencio, P., Barrientos Medina, R., Plasencia-Vázquez, A., Villegas, P., Domínguez-Carrasco, M., Gutiérrez-Báez, C., Aguirre-Crespo, F., Vargas-Contreras, J., Uc-Ruvalcava, S. y Poot Sarmiento, I. (2020). Estructura y composición florística de la selva mediana subcaducifolia en Hobomó, Campeche, México. *Madera y bosques*, 26(1), 1-14. <https://doi.org/10.21829/myb.2020.2611899>

- Zarco-Espinosa, V. M., Valdez-Hernández, J. L., Ángeles-Pérez, G. y Castillo-Acosta, O. (2010). Estructura y diversidad de la vegetación arbórea del Parque Estatal Agua Blanca, Macuspana, Tabasco. *Universidad y ciencia*, 26(1), 1-17.
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0186-29792010000100001&lng=es&tlng=es.
- Zirbel, C. R. y Brudvig, L. A. (2020). Trait–environment interactions affect plant establishment success during restoration [Las interacciones rasgo-ambiente afectan el éxito del establecimiento de las plantas durante la restauración]. *Ecology*, 101(3), 1-7.
<https://doi.org/10.1002/ecy.2971>
- Zuloaga, J., Currie, D. J. y Kerr, J. T. (2019). The origins and maintenance of global species endemism [Los orígenes y el mantenimiento del endemismo global de especies]. *Global Ecology and Biogeography*, 28(2), 170-183. Recuperado en septiembre de 2023, de https://rpubs.com/Joaquin_AR/287787 .

ANEXOS

Anexo 1.

Especies registradas en los coquinales

Especies	Hábito	IVI	IUCN
ACANTHACEAE			
<i>Aphelandra scabra</i> (Vahl) Sm.	Subarbusto	0.428	NE
<i>Justicia cardinalis</i> Carnevali & Duno	Subarbusto	2.628	NE
<i>Ruellia paniculata</i> L.	Hierba	6.329	NE
<i>Tetramerium nervosum</i> Nees	Hierba	0.898	NE
AGAVACEAE			
<i>Agave angustifolia</i> Haw. var. <i>angustifolia</i>	Hierba	6.698	LC
AIZOACEAE			
<i>Trianthema portulacastrum</i> L.	Hierba	1.692	NE
AMARANTHACEAE			
<i>Alternanthera flavescens</i> Kunth	Hierba	2.005	NE
<i>Alternanthera obovata</i> (M.Martens & Galeotti) Millsp.	Hierba	0.867	NE
<i>Gomphrena vermicularis</i> L.	Hierba	3.203	NE
AMARYLLIDACEAE			
<i>Zephyranthes orellanae</i> Carnevali, Duno & J.L.Tapia	Hierba	1.312	EN**
ANACARDIACEAE			
<i>Metopium brownei</i> (Jacq.) Urb.	Árbol	0.896	LC
APOCYNACEAE			
<i>Asclepias curassavica</i> L.	Hierba	2.263	NE
<i>Cascabela gaumeri</i> (Hemsl.) Lippold	Árbol	0.448	LC
<i>Plumeria obtusa</i> L.	Árbol	3.343	LC
ARACEAE			
<i>Anthurium schlechtendalii</i> Kunth	Hierba	0.905	NE
ARECACEAE			
<i>Sabal mexicana</i> Mart.	Árbol	0.816	LC
ASTERACEAE			
<i>Eclipta prostrata</i> (L.) L.	Hierba	0.467	LC
<i>Pluchea odorata</i> (L.) Cass.	Hierba	0.428	NE
<i>Wedelia acapulcensis</i> Kunth	Hierba	0.432	NE
BIGNONIACEAE			
<i>Crescentia cujete</i> L.	Árbol	1.138	LC
<i>Parmentiera millspaughiana</i> L.O.Williams	Arbusto	4.106	LC
BIXACEAE			

Especies	Hábito	IVI	IUCN
<i>Cochlospermum vitifolium</i> (Willd.) Spreng.	Árbol	1.633	LC
<i>Cochlospermum wrightii</i> (A.Gray) Byng & Christenh.	Hierba	0.525	NE
BORAGINACEAE			
<i>Cordia sebestena</i> L.	Árbol	0.551	LC
<i>Heliotropium angiospermum</i> Murray	Hierba	0.728	NE
<i>Varronia curassavica</i> Jacq.	Arbusto	1.627	NE
BROMELIACEAE			
<i>Bromelia karatas</i> L.	Hierba (Terrestre)		NE
<i>Tillandsia dasyliriifolia</i> Baker	Hierba (Epífita)		LC**
<i>Tillandsia recurvata</i> (L.) L.	Hierba (Epífita)		NE
<i>Tillandsia paucifolia</i> Baker	Hierba (Epífita)		NT**
BURSERACEAE			
<i>Bursera schlechtendalii</i> Engl.	Árbol	2.846	LC
<i>Bursera simaruba</i> (L.) Sarg.	Árbol	2.042	LC
CACTACEAE			
<i>Acanthocereus tetragonus</i> (L.) Hummelinck	Hierba (Suculenta)	4.442	LC
<i>Mammillaria heyderi</i> subsp. <i>gaumeri</i> (Britton & Rose) D.R. Hunt	Hierba (Suculenta)	0.897	NT**
<i>Opuntia inaperta</i> (Schott ex Griffiths) D.R.Hunt	Hierba (Suculenta)	3.078	LC**
<i>Opuntia stricta</i> (Haw.) Haw.	Hierba (Suculenta)	2.934	LC
<i>Pilosocereus gaumeri</i> (Britton & Rose) Backeb.	Arbusto (Suculento)	0.914	LC**
<i>Selenicereus grandiflorus</i> subsp. <i>donkelaarii</i> (Salm-Dyck) Ralf Bauer	Hierba (Suculenta)	0.930	LC
<i>Stenocereus pruinosus</i> (Otto ex Pfeiff.) Buxb.	Árbol (Suculento)	0.449	LC
CAMPANULACEAE			
<i>Lobelia yucatana</i> E.Wimm.	Hierba	0.448	EN**
CAPPARACEAE			
<i>Morisonia incana</i> (Kunth) Christenh. & Byng	Árbol	0.545	LC
COMBRETACEAE			
<i>Conocarpus erectus</i> L.	Árbol	3.461	LC
COMMELINACEAE			
<i>Commelina diffusa</i> Burm.f.	Hierba	2.229	LC
<i>Commelina erecta</i> L.	Hierba	1.760	LC

Especies	Hábito	IVI	IUCN
CONVOLVULACEAE			
<i>Evolvulus convolvuloides</i> (Willd. ex Schult.) Stearn.	Hierba	4.904	NE
<i>Ipomoea carnea</i> Jacq. ssp. <i>carnea</i>	Trepadora	10.166	NE
<i>Ipomoea pes-caprae</i> (L.) R.Br.	Trepadora	3.948	NE
<i>Ipomoea sororia</i> D.F.Austin & J.L.Tapia	Trepadora		VU**
<i>Ipomoea trifida</i> (Kunth) G.Don	Trepadora		LC
<i>Ipomoea triloba</i> L.	Trepadora		LC
CUCURBITACEAE			
<i>Cucurbita moschata</i> Duchesne	Trepadora	0.437	NE
<i>Ibervillea lindheimerii</i> (A. Gray) Greene	Trepadora		NE
CYPERACEAE			
<i>Cyperus elegans</i> L.	Hierba	3.612	NE
<i>Eleocharis geniculata</i> (L.) Roem. & Schult.	Hierba	1.609	LC
<i>Fimbristylis cymosa</i> R.Br.	Hierba	1.480	LC
<i>Rhynchospora corymbosa</i> (L.) Britton	Hierba	1.140	LC
<i>Rhynchospora scutellata</i> Griseb.	Hierba	0.564	NE
<i>Rhynchospora tracyi</i> Britton	Hierba	0.431	NE
EUPHORBIACEAE			
<i>Acalypha gaumeri</i> Pax & K.Hoffm.	Subarbusto	0.687	NT**
*<i>Croton arboreus</i> Millsp.	Árbol	2.964	LC
<i>Croton humilis</i> L.	Subarbusto	0.718	NE
<i>Croton punctatus</i> Jacq.	Subarbusto	0.478	LC
<i>Enriquebeltrania crenatifolia</i> (Miranda) Rzed.	Arbusto	0.502	LC**
<i>Euphorbia adenoptera</i> Bertol.	Hierba	0.558	NE
<i>Euphorbia dioeca</i> Kunth	Hierba	0.428	NE
<i>Euphorbia mesembryanthemifolia</i> Jacq.	Hierba	0.430	LC
<i>Euphorbia personata</i> (Croizat) V.W.Steinm.	Hierba (Sculenta)	0.515	LC
<i>Euphorbia</i> sp.	Hierba	0.428	
<i>Jatropha gaumeri</i> Greenm.	Árbol	5.448	LC**
FABACEAE			
<i>Cenostigma gaumeri</i> (Greenm.) Gagnon & G.P.Lewis	Árbol	1.724	LC**
<i>Ctenodon fascicularis</i> (Schltdl. & Cham.) A.Delgado	Subarbusto	0.431	NE
<i>Chamaecrista chamaecristoides</i> (Collad.) Greene var. <i>chamaecristoides</i>	Hierba	0.550	NE
<i>Chamaecrista flexuosa</i> var. <i>texana</i> (Buckley) H.S.Irwin & Barneby	Hierba	0.583	NE

Especies	Hábito	IVI	IUCN
<i>Coulteria cubensis</i> (Greenm.) Sotuyo & G.P.Lewis	Árbol	1.768	NE
<i>Dalbergia glabra</i> (Mill.) Standl.	Árbol	1.112	LC
<i>Desmanthus virgatus</i> (L.) Willd.	Hierba	3.947	LC
*Diphysa yucatanensis Hanan-Alipi & M.Sousa	Árbol	1.139	NE
<i>Galactia striata</i> (Jacq.) Urb.	Trepadora		NE
<i>Haematoxylum campechianum</i> L.	Árbol	28.558	LC
Havardia albicans (Kunth) Britton & Rose	Árbol	3.640	LC**
<i>Havardia platyloba</i> (Bertero ex DC.) Britton & Rose	Árbol	4.398	NE
<i>Indigofera trita</i> L.f.	Arbusto	0.439	LC
<i>Marina scopa</i> Barneby	Arbusto	0.483	NE
<i>Mimosa bahamensis</i> Benth.	Árbol	1.673	LC
<i>Mimosa distachya</i> var. <i>oligacantha</i> (DC.) Barneby	Arbusto	2.825	NE
<i>Neltuma juliflora</i> (Sw.) Raf. var. <i>juliflora</i>	Árbol	3.387	NE
<i>Pithecellobium unguis-cati</i> (L.) Benth.	Árbol	3.971	LC
Senegalia gaumeri (S.F.Blake) Britton & Rose	Árbol	2.048	LC**
Senna pallida (Vahl) H.S.Irwin & Barneby	Árbol	0.447	EN**
<i>Senna racemosa</i> (Mill.) H.S.Irwin & Barneby var. <i>racemosa</i>	Árbol	1.074	LC
<i>Sigmoidotropis elegans</i> (Piper) A.Delgado	Trepadora		NE
<i>Stylosanthes humilis</i> Kunth	Hierba	3.615	NE
<i>Tara vesicaria</i> (L.) Molinari, Sánchez Och. & Mayta	Árbol	2.008	LC
<i>Tephrosia cinerea</i> (L.) Pers.	Hierba	0.545	NE
<i>Vachellia collinsii</i> (Saff.) Seigler & Ebinger	Árbol	1.535	LC
<i>Vachellia cornigera</i> (L.) Seigler & Ebinger	Árbol	0.564	NE
<i>Vachellia farnesiana</i> (L.) Wight & Arn.	Árbol	1.326	LC
HYDROLEACEAE			
<i>Hydrolea spinosa</i> L.	Hierba	0.428	NE
LAMIACEAE			
<i>Ocimum campechianum</i> Mill.	Hierba	2.253	NE
LORANTHACEAE			
<i>Psittacanthus mayanus</i> Standl. & Steyererm.	Hierba (Epífita)		NE
LYTHRACEAE			

Especies	Hábito	IVI	IUCN
<i>Cuphea decandra</i> W.T.Aiton	Hierba	0.980	NE
<i>Cuphea gaumeri</i> Koehne	Hierba	2.423	LC**
MALPIGHIACEAE			
<i>Malpighia spathulifolia</i> F.K.Mey.	Árbol	1.804	LC
MALVACEAE			
<i>Abutilon viscosum</i> (L.) Dorr	Subarbusto	0.432	NE
<i>Cienfuegosia yucatanensis</i> Millsp.	Hierba	13.224	NE
<i>Corchorus siliquosus</i> L.	Hierba	0.428	NE
<i>Guazuma ulmifolia</i> Lam.	Árbol	0.428	LC
<i>Malachra capitata</i> (L.) L.	Hierba	0.428	NE
<i>Melochia tomentosa</i> L.	Subarbusto	1.765	NE
<i>Melochia villosa</i> (Mill.) Fawc. & Rendle	Hierba	1.127	NE
<i>Sida ciliaris</i> L.	Hierba	23.991	NE
<i>Waltheria rotundifolia</i> Schrank	Hierba	3.103	NE
MARSILEACEAE			
<i>Marsilea vestita</i> Hook. & Grev.	Hierba	1.009	NE
ORCHIDACEAE			
<i>Cyrtopodium macrobulbon</i> (Lex.) G.A.Romero & Carnevali	Hierba	0.490	NE
<i>Myrmecophila christinae</i> Carnevali & Gómez-Juárez var. <i>christinae</i>	Hierba (Epífita)		LC**
PASSIFLORACEAE			
<i>Passiflora bicornis</i> Mill.	Trepadora		NE
<i>Passiflora foetida</i> L.	Trepadora		NE
PLANTAGINACEAE			
<i>Mecardonia procumbens</i> (Mill.) Small	Hierba	3.671	NE
POACEAE			
<i>Bouteloua repens</i> (Kunth) Scribn. & Merr.	Hierba	1.925	NE
<i>Chloris barbata</i> Sw.	Hierba	1.150	NE
<i>Dactyloctenium aegyptium</i> (L.) Willd.	Hierba	0.431	NE
<i>Eragrostis ciliaris</i> (L.) R.Br.	Hierba	2.055	NE
<i>Eragrostis secundiflora</i> J.Presl	Hierba	0.967	NE
<i>Setaria geminata</i> (Forssk.) Veldkamp	Hierba	1.122	LC
<i>Sporobolus pyramidatus</i> (Lam.) Hitchc.	Hierba	1.998	NE
POLYGONACEAE			
<i>Gymnopodium floribundum</i> Rolfe	Árbol	0.474	LC
<i>Neomillspaughia emarginata</i> (H.Gross) S.F.Blake	Árbol	5.407	LC**
PORTULACACEAE			
<i>Portulaca halimoides</i> L.	Hierba	0.428	NE

Especies	Hábito	IVI	IUCN
<i>Portulaca oleracea</i> L.	Hierba	3.634	LC
<i>Portulaca rubricaulis</i> Kunth	Hierba	4.020	NE
PRIMULACEAE			
<i>Bonellia macrocarpa</i> (Cav.) B.Ståhl & Källersjö ssp. <i>macrocarpa</i>	Árbol	0.443	LC
RUBIACEAE			
<i>Ernodea littoralis</i> Sw.	Subarbusto	0.493	LC
<i>Randia aculeata</i> L.	Arbusto	1.832	LC
<i>Randia obcordata</i> S.Watson	Arbusto	1.674	LC
<i>Spermacoce</i> sp.	Hierba	1.089	
RUTACEAE			
<i>Esenbeckia pentaphylla</i> (Macfad.) Griseb.	Árbol	1.377	NT
SALICACEAE			
<i>Casearia randioides</i> Lundell	Árbol	0.552	LC
SAPINDACEAE			
<i>Cardiospermum corindum</i> L.	Trepadora		NE
SAPOTACEAE			
<i>Sideroxylon americanum</i> (Mill.) T.D.Penn.	Árbol	0.571	LC
<i>Sideroxylon celastrinum</i> (Kunth) T.D.Penn.	Árbol	1.324	LC
SCROPHULARIACEAE			
<i>Capraria biflora</i> L.	Hierba	0.984	NE
SOLANACEAE			
<i>Solanum houstonii</i> Martyn	Subarbusto	1.382	NE
VERBENACEAE			
<i>Phyla nodiflora</i> (L.) Greene	Hierba	13.844	LC
<i>Stachytarpheta indica</i> (L.) Vahl	Hierba	2.019	NE
<i>Stachytarpheta jamaicensis</i> (L.) Vahl	Subarbusto	1.751	LC
<i>Tamonea curassavica</i> (L.) Pers.	Hierba	0.495	NE
VITACEAE			
<i>Cissus trifoliata</i> (L.) L	Trepadora		NE

Notas. En negritas especies endémicas de la PBPY. *Endémicas de México. ***Basados en Carnevali et al (2021).