UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN BIODIVERSIDAD Y CONSERVACIÓN

TESIS

DIVERSIDAD ALFA Y BETA DE MARIPOSAS DIURNAS (PAPILIONOIDEA) EN LOS ALREDEDORES DE CEMENTERAS EN ATOTONILCO DE TULA, HIDALGO.

Para obtener el grado de Maestra en Ciencias en Biodiversidad y Conservación

PRESENTA

Lic. Fátima Cruz Márquez

Directora
Dra. Ana Paola Martínez Falcón

Codirector
Dr. Ignacio Esteban Castellanos Sturemark

Mineral de la Reforma, Hgo., México., abril de 2025

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería
School of Engineering and Basic Sciences
Área Académica de Biología
Department of Biology

Mineral de la Reforma, Hgo., a 10 de abril de 2025

Número de control: ICBI-AAB/301/2025
Asunto: Autorización de impresión.

MTRA.OJUKY DEL ROCIO ISLAS MALDONADO
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UAEH

El Comité Tutorial del nombre del producto que indique el documento curricular del programa educativo de posgrado titulado **"Diversidad alfa y beta de mariposas diurnas (Papilionoidea) en los alrededores de cementeras en Atotonilco de Tula, Hidalgo"**, realizado por la sustentante **Fátima Cruz Márquez** con número de cuenta **368635** perteneciente al programa de **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN BIODIVERSIDAD Y CONSERVACIÓN**, una vez que ha revisado, analizado y evaluado el documento recepcional de acuerdo a lo estipulado en el Artículo 110 del Reglamento de Estudios de Posgrado, tiene a bien extender la presente:

AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

Por lo que el sustentante deberá cumplir los requisitos del Reglamento de Estudios de Posgrado y con lo establecido en el proceso de grado vigente.

Atentamente
"Amor, Orden y Progreso"

El Comité Tutorial

Dra. Ana Paola Martínez Falcón
Vocal

Dr. Ignacio Esteban Castellanos Sturemark
Presidente

Dr. Pablo Octavio Aguilar
Secretario

Dr. José Luis Salinas Gutiérrez
Suplente

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Centro de Investigaciones Biológicas
POSGRADO
Área Académica de Biología
INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

LFRP

Ciudad del Conocimiento, Carretera Pachuca-Tulancingo Km. 4.5 Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México. C.P. 42184
Teléfono: 52 (771) 71 720 00 Ext. 40063, 40064 y 40065
aab_icbi@uaeh.edu.mx, maritzal@uaeh.edu.mx

RESUMEN.....6
1. INTRODUCCIÓN.....7
2. ANTECEDENTES.....8
2.1 Breve historia del cemento en el mundo, México e Hidalgo.....8
2.2 Proceso de elaboración del cemento.....10
2.3 Impactos ambientales de la industria del cemento.....11
2.4 Ejemplos de los efectos de la industria del cemento en la biodiversidad.....15
2.5 Mariposas diurnas como bioindicadores.....17
2.6 Estudios de los impactos de la industria minera sobre lepidópteros.....19
3. JUSTIFICACIÓN.....19
4. OBJETIVOS.....20
4.1 Objetivo general.....20
4.2 Objetivos particulares.....20
5. HIPÓTESIS.....21
6. MÉTODO.....21
6.1 Área de estudio.....21
6.1.1 Determinación de la cobertura vegetal de Atotonilco de Tula y Ajacuba.....22
6.2 Obtención de datos de campo.....24
6.2.1 Colecta de mariposas diurnas.....24
6.3 Trabajo de laboratorio.....26
6.4 Obtención de datos de íNaturalistMX.....26
6.5 Análisis de datos.....27
6.5.1 Diversidad alfa.....27
6.5.2 Composición de especies.....28
6.5.3 Diversidad beta.....28
6.5.4 Biocuración de las especies de mariposas diurnas de íNaturalistMX.....29
7. RESULTADOS.....29
7.1 Diversidad alfa.....29
7.2 Composición de especies.....38
7.3 Diversidad beta.....40

7.4 Lista taxonómica de las especies de mariposas diurnas obtenidas de íNaturalistMX.....41
8. DISCUSIÓN.....43
8.1 Diversidad alfa.....43
8.1.1 Completitud del muestreo.....43
8.1.2 Riqueza y abundancia de mariposas diurnas.....44
8.1.3 Comparación de la riqueza y abundancia de mariposas entre el área con vegetación nativa y áreas ubicadas a diferentes distancias de dos cementeras.....46
8.1.4 Riqueza y abundancia de mariposas en temporada de lluvias y secas.....47
8.1.5 Curva Rango-Abundancia.....48
8.2 Composición de especies y diversidad beta.....52
8.2.1 Composición de especies.....52
8.2.2 Diversidad beta: anidamiento y recambio durante ambas temporadas.....53
8.2.2.1 Diversidad beta: anidamiento y recambio en temporada de sequía.....58
8.2.2.2 Diversidad beta: anidamiento y recambio en temporada de lluvia.....61
8.2.3 Especies indicadoras de disturbio y conservación compartidas entre áreas.....64
8.3 Uso de íNaturalistMX como recurso complementario en inventarios de mariposas diurnas.....66
9. CONCLUSIONES.....67
10. RECOMENDACIONES.....68
11. LITERATURA CITADA.....69
12. ANEXOS.....84

AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente a todos los ejemplares de mariposas que fueron sacrificados en este estudio, ya que su contribución ha sido fundamental para comprender el impacto de la industria cementera sobre ellas, un tema que, en general, ha sido poco abordado por la comunidad científica.

También quiero expresar mi gratitud a todas las personas que han formado parte de este trabajo: amigos, familiares e interesados, quienes con su esfuerzo y dedicación contribuyeron a que esta investigación se hiciera realidad.

Agradezco a mis asesores por sus valiosos consejos, su paciencia y, sobre todo, por su tiempo. Gracias por darme la oportunidad de desarrollar un tema que, para mí, es de gran importancia.

Finalmente, agradezco al CONAHCYT por la beca 841783, que permitió el desarrollo de este trabajo y a la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo por brindarme la oportunidad de formar parte de su institución.

RESUMEN

La producción de cemento es una actividad económica muy importante a nivel mundial, pero conlleva impactos ambientales significativos, como la pérdida de biodiversidad, emisiones de partículas y gases nocivos, y un uso elevado de energía y agua. En Atotonilco de Tula, Hidalgo, operan empresas cementeras altamente productivas y se desconocen los efectos que puedan provocar la biodiversidad. Las mariposas, utilizadas como bioindicadores de la salud ambiental, ofrecen una forma de evaluar el impacto de estas cementeras en la biodiversidad local. Para ello, se recolectaron mariposas diurnas en Atotonilco de Tula durante la estación seca (abril y mayo) y la de lluvias (septiembre y octubre) en 2023. Se analizó la diversidad alfa con números de Hill (q^0 y q^1) y beta con el método de Baselga (2010), considerando cuatro distancias a las cementeras (dos cerca y dos lejos) y una zona con vegetación nativa en un municipio vecino sin presencia de cementeras. Se obtuvo una completitud de inventario total mayor al 85% y se recolectaron 369 individuos de 54 especies de mariposas, pertenecientes a las familias Hesperiidae (S=17), Lycaenidae (S=8), Nymphalidae (S=13), Papilionidae (S=3), Pieridae (S=10) y Riodinidae (S=3). No se encontraron diferencias significativas en diversidad para q^0 y q^1, solo en la estación seca, donde la vegetación nativa mostró mayor diversidad ecológica en comparación con las áreas cercanas a las cementeras. Se determinó un alto recambio de especies en todas las zonas estudiadas. Aunque la presencia de cementeras no parece alterar notablemente la riqueza y diversidad de mariposas en comparación con la vegetación nativa, sí afecta la composición de especies en las áreas cercanas. Es importante continuar con estudios similares a fin de generar más información sobre efectos de las cementeras sobre la biodiversidad.

1. INTRODUCCIÓN

El cemento, un material fundamental en la construcción, se produce mediante un proceso industrial que incluye la calcinación de mezclas de materiales pétreos como calizas, margas y arcillas. Este proceso genera clínker, que posteriormente se transforma en cemento. La producción de cemento comenzó en el siglo XIX y, hasta la fecha, se ha consolidado como uno de los materiales de construcción más utilizados a nivel mundial. Actualmente, se fabrica en más de 150 países (Prieto, 2016) debido a su popularidad, impulsada por beneficios como su fácil acceso, bajo costo y alta resistencia. Sin embargo, esta alta demanda tiene importantes repercusiones ambientales. La producción de cemento genera contaminantes en sus distintas fases, los cuales afectan al ecosistema de diversas maneras (Silva y Rodríguez, 2022).

No obstante, la contaminación ambiental de la industria minera por cementeras es un tema recurrente (León-Velez y Guillén-Mena, 2019; González, 2019; Ventura, 2019; Forero-Medina *et al.,* 2020; Álvarez, 2023; Araujo, 2023; Rincón *et al.,* 2023), del cual se sabe poco sobre los efectos que puede estar provocando en la biodiversidad, principalmente los negativos, lo cual es de reflexionar, al ser una industria que genera cambios topográficos al ocupar extensos terrenos forestales mismos que despojan a toda la biodiversidad presente, y entre sus derroteros se manifiesta la pérdida. También es responsable de la emisión de polvo y partículas nocivas, uso, apropiación y contaminación del agua donde se instalan, contaminación de suelo, generación de ruido y vibraciones, fragmentación del ecosistema, uso elevado de energía, emisión de gases, entre otras consecuencias (Pérez *et al.,* 2021; Silva y Rodríguez, 2022), lo que genera la necesidad de contar con más estudios que evalúen estos aspectos sobre las especies.

En México, la minería representa una de las principales causas de emergencia social y ambiental (Gómez y Peláez, 2020). Un ejemplo de esto se encuentra en el municipio de Atotonilco de Tula, Hidalgo, donde operan cementeras de relevancia mundial. Sin embargo, el impacto de estas industrias sobre la biodiversidad, particularmente en insectos como las mariposas, aún no ha sido plenamente evaluado. En este municipio, la explotación de canteras y la fabricación de cemento han llevado a la degradación y eliminación de los ecosistemas locales, afectando significativamente la biodiversidad y los hábitats remanentes.

Las mariposas son reconocidas como bioindicadoras ecológicas debido a que su presencia o ausencia refleja alteraciones en el hábitat, fragmentación, impactos del cambio climático, y cambios en la composición de la biota asociada a comunidades o ecosistemas, así como en sus estados sucesionales. Además, permiten identificar disturbios ambientales que amenazan la biodiversidad de los ecosistemas (Orta *et al.,* 2022).

Este grupo destaca por características que las convierten en organismos ideales para estudios ecológicos: ciclos de vida cortos, alta sensibilidad a cambios en condiciones abióticas (como temperatura, humedad e intensidad lumínica), y una taxonomía ampliamente documentada, lo que facilita su estudio y análisis.

En el presente estudio, se emplean mariposas diurnas como bioindicadores para evaluar el impacto de la industria cementera sobre su riqueza y abundancia en Atotonilco de Tula. Estos análisis buscan generar información relevante sobre el estado de conservación de los ecosistemas locales. Los objetivos específicos incluyen evaluar la diversidad alfa y beta de las mariposas en distintas distancias de dos cementeras ubicadas en Atotonilco de Tula, y comparar estos resultados con los obtenidos en una zona de vegetación nativa localizada en Ajacuba.

2. ANTECEDENTES

2.1 Breve historia del cemento en el mundo, México e Hidalgo

La evolución de los procesos de construcción se documenta desde tiempos antiguos, remontándose alrededor de 7000 a.C. según evidencias encontradas en construcciones en territorio israelí y la antigua Yugoslavia. Existen registros datados en el año 2570 a.C. donde se empleaban mezclas de yeso y caliza disueltas en agua para unir bloques de piedra, como se evidencia en la Gran Pirámide de Gizeh (Sanjuán y Chinchón, 2014).

En torno al año 200 a.C., la cultura romana demostró un conocimiento temprano en el uso de diversos materiales cementantes, incluyendo calizas de origen volcánico, marcando así el inicio de la historia del cemento. Gracias a los escritos de Vitruvio, se tiene evidencia del empleo de cal apagada, mezclada con puzolanas para la creación de lo que se conoce como ‘‘cemento romano’’, que se utilizaba en el revestimiento de muros. A este ‘‘cemento

romano'' se le incorporaban áridos gruesos en una proporción de 1:2, lo que resulta en la creación del "*Opus Caementicium*" (Mayó, 2015).

Con el cemento romano, se construyeron obras importantes como el Foro Romano y el Panteón de Roma (27 a.C.). En ese período, la mayoría de los materiales utilizados eran productos naturales (mezclas de cal, agua, piedras, arena y ladrillos), algunos de los cuales eran sometidos a tratamientos térmicos. Estos materiales son la base para la construcción en Europa hasta 1756, fecha en la que se descubrió el primer conglomerante hidráulico (Sanjuán y Chinchón, 2014).

En la primera mitad del siglo XVIII, en Inglaterra, se produjo un avance significativo en la evolución de los conglomerantes, especialmente con el estudio detallado realizado por John Smeaton en 1756 sobre los aglomerantes disponibles en esa época, en el contexto de la construcción de un faro en Eddystone. John Smeaton tenía como objetivo seleccionar el conglomerante más adecuado para la construcción en una zona propensa a fuertes temporales, así como ampliar las posibilidades de empleo de los aglomerantes existentes. Después, en 1824, Joseph Aspdin patentó el primer cemento Portland, obtenido a partir de caliza arcillosa calcinada a altas temperaturas (Mayó, 2015), mientras que, en 1845, Isaac Johnson logró avances significativos en el proceso de producción de cemento al fabricar una mezcla de caliza y arcilla que se transforma en clínker, se contribuye así al desarrollo de la industria del cemento artificial durante la Revolución Industrial (Burgos, 2009).

El auge de la industria del cemento ocurrió en el siglo XX, gracias a los experimentos de los químicos franceses Vicat y Le Chatelier y el alemán Michaélis, quienes logran un cemento de calidad homogénea; la invención del horno rotatorio para calcinación y el molino tubular y los métodos de transportar hormigón fresco creados por Juergen Hinrich Magens quienes lo patentan entre 1903 y 1907 (Rodrigues, 2019).

En México, la industria cementera tuvo sus inicios en 1906 con Cementos Monterrey, establecida en la ciudad del mismo nombre, la cual posteriormente se transforma en Cemex (Salomón, 2006). Sin embargo, el auge ocurrió durante la época de la industrialización por reemplazo, fomentando en este periodo, la producción nacional a través de incentivos fiscales y apoyo financiero. En el lapso de 1940 a 1980, la capacidad instalada de la industria experimentó un incremento significativo de 574 millones a 17.02 millones de toneladas

métricas (Vásquez y Corrales, 2016). A partir de la década de los noventa, las empresas cementeras en México llevaron a cabo importantes reconstrucciones mediante adquisiciones y fusiones, movimientos de gran relevancia para comprender la distribución del mercado, la de los precios y la competencia en la actualidad. En el presente, México es un importante productor de minerales como plata, plomo, zinc, sal, yeso, oro, cobre entre otros minerales (Azamar-Alonso y Téllez-Ramírez, 2022).

El estado de Hidalgo desempeña un papel fundamental en la economía mexicana, tanto en la historia reciente como en la antigua. Con más de 500 años de historia minera diversa, ha sido un actor destacado en el desarrollo minero del país. Su historia con la industria del cemento comienza con la inversión de capitalistas ingleses en el estado en 1881 cuando el empresario inglés Henry Gibbon alquila una fracción de la Hacienda de Jasso e instala una fábrica de cal hidráulica, La Cruz Azul, asociándose dos años después con Joseph Watson, quién invirtió en la industria para poder crecer más. En 1906 su sociedad quebró y fue entonces que la negociación pasó a Fernando Pimentel y Fagoaga (Servicio Geológico Mexicano, 2020).

2.2 Proceso de elaboración del cemento

La producción del cemento consta de diferentes etapas, inicia con la obtención de materias primas como caliza, arcilla, arena, mineral de hierro y yeso, extraídas de minas o canteras a cielo abierto. Esta actividad implica la eliminación de la vegetación y la preparación del terreno antes de recurrir a métodos de extracción como detonaciones con explosivos y perforación de rocas, cuando son extraídos, los materiales son transportados a la planta de cemento para su procesamiento (Sanjuán y Chinchón, 2014; Rincón *et al.,* 2023).

Una vez en la planta, las rocas son trituradas en dos fases, reducen su tamaño a través de trituradoras primarias y secundarias. Este proceso las convierte en fragmentos de aproximadamente 25 cm y luego en partículas de unos 2 mm de diámetro (Noguera, 2020; Rincón *et al.,* 2023).

En el área de molienda, la materia prima anteriormente triturada y pre-homogeneizada se somete a un proceso fino para obtener ‘‘harina cruda’’, un polvo muy fino que se almacena en silos para mejorar su uniformidad. Posteriormente, este polvo se calienta en

precalentadores ciclónicos para su preparación antes de ingresar al proceso de cocción en el horno (Noguera, 2020).

La fabricación del clínker, componente esencial en la producción de cemento, continúa con el uso de grandes hornos que alcanzan temperaturas internas de hasta 1500°C, donde la harina cruda o materia prima se transforma en clínker, que se presenta como pequeños nódulos de color gris oscuro, con un tamaño de tres a cuatro centímetros, formados por conglomerados debido a la semi fusión de la materia prima original. Posteriormente, el clínker es enfriado con aire, lo que resulta en la formación de pellets de clínker, que se almacenan en áreas específicas conocidas como canchas o silos de clínker. Este proceso varía según el método de fabricación, ya sea vía seca, semi-seca, semi-húmeda o húmeda, adaptándose al contenido de humedad de las materias primas y enfriando rápidamente el material para obtener clínker (Cerecer y Valdés, 2022; Rincón *et al.,* 2023).

Posteriormente, se muele el clínker para producir cemento, al que se le añaden yeso y otros componentes según las especificaciones deseadas. Los principales elementos del clínker son calcio, silicio, aluminio, hierro, magnesio, sodio y potasio (Martínez, 2020).

Una vez obtenido el cemento, se almacena en silos según su tipo antes de ser envasado y distribuido a los clientes mediante ferrocarriles, camiones u otros medios de transporte (Noguera, 2020; Rincón *et al.,* 2023).

2.3 Impactos ambientales de la industria del cemento

La instalación de una planta de cemento en comunidades se asocia con problemas ambientales desde el momento en que se instala una cementera, pues, desencadena un problema ambiental que altera el ecosistema circundante. Estas industrias requieren de extensos terrenos, lo que implica la eliminación de elementos abióticos y bióticos en la zona, sin garantizar en muchas ocasiones, la reubicación de especies (Gómez, 2012) ni la implementación de medidas para restaurar el sitio una vez concluida la extracción de materia prima en las canteras (Martínez, 2020).

Estas acciones son fácilmente visibles independientemente de su ubicación (Macedo, 2016). Se manifiestan en la alteración del paisaje circundante y en la destrucción o perturbación de hábitats naturales (Montes de Oca-Risco *et al.,* 2018). Además, los impactos ambientales de

esta actividad abarcan diversos aspectos, por ejemplo, a nivel global, la industria cementera representa el 60% de la materia prima extraída de la litósfera, resultando en una de las actividades que consume mayor cantidad de recursos naturales (León-Velez y Guillén-Mena, 2019).

La cantidad de agua utilizada en la fabricación de cemento es otro aspecto de gran importancia, pero con estudios e interpretación. La producción de cemento representa el 9% de la extracción de agua industrial a nivel mundial, agotando a menudo los suministros de agua potable y para riego. Se estima que para el año 2050, el 75% de la demanda de agua para la producción de cemento puede ser insostenible (Silva y Rodríguez, 2022).

La etapa de producción del clínker es la que consume más emergía, al igual que durante la trituración de materia prima, al igual que en todas las fases donde se requiere energía, lo que tiene un impacto significativo en el medio ambiente (Silva y Rodríguez, 2022; Rincón *et al.,* 2023). A nivel mundial, se estima que el uso elevado de energía en la industria del cemento representa alrededor del 7% (Rivas, 2019).

Los hornos para producción de clínker se alimentan principalmente de energía eléctrica y térmica, sin embargo, para reducir el consumo de combustibles fósiles (fuel oil, bunker, pet coke, entre otros), algunas plantas utilizan combustibles alternativos (León-Velez y Guillén-Mena, 2019), práctica conocida como "coincineración" o "coprocesamiento". Este proceso implica la incineración de desechos municipales para aprovechar su capacidad calórica y sustituir el combustible primario utilizado en los procesos de elaboración del cemento (León-Velez y Guillén-Mena, 2019).

En México, la industria del cemento tiene permitido utilizar combustibles alternos en una proporción de hasta el 30% del total de combustibles empleados en los hornos (SEMARNAT, 2010). Esta práctica se lleva a cabo en instalaciones como Geocycle México en Apaxco y en la cementera Cemex en Atotonilco de Tula, donde las empresas y el gobierno municipal obtienen beneficios al desechar los residuos, sin embargo, al tratarse de la incineración de diversos productos de desecho como llantas en desuso, residuos plásticos, aceites usados, solventes, se liberan sustancias altamente tóxicas que se emiten a la atmósfera y que por sus propiedades pueden ser desplazados a diferentes sitios, incluso a sitios alejados de las cementeras, como cultivos, suelos, cuerpos de agua, humanos y biodiversidad (Martínez,

2020; Fundación Internacional Amigos de la Tierra, 2018). Considerando que la actividad de incineración de productos de desecho se realiza en municipios colindantes, los efectos negativos podrían ser sinérgicos.

Se sabe que en Atotonilco de Tula las prácticas agrícolas disminuyen, lo cual se socia a la degradación y erosión del suelo y pérdida de nutrientes, así como por la contaminación que provocan los residuos tóxicos arrojados por los hornos de la industria cementera, entre los que se encuentran dioxinas, furanos, policlorobifenilos y hexaclorobenceno, los cuales provienen de la quema de combustibles alternos, incluyendo llantas, aceites, solventes y residuos industriales (Caballero, 2023).

La producción de clínker es responsable de la mitad de las emisiones en la fabricación de cemento, ya que los hornos mantienen una temperatura constante entre 600°C y 1500°C, generando emisiones de CO_2, SO_2, NOx, dioxinas, furanos y metales pesados, conocidos como principales elementos cancerígenos (Martínez, 2018; Hernández, 2020). De acuerdo con Chatham House, la producción de clínker representa alrededor del 8% de emisiones mundiales de CO_2 (Rivas, 2019).

El dióxido de azufre (SO_2) y el óxido de nitrógeno (NOx) son gases ácidos que contribuyen a la acidificación del medio ambiente. El SO_2 proviene principalmente de la quema de combustibles fósiles y las emisiones de vehículos y maquinaria, mientras que el NOx se genera principalmente a partir de la quema de combustibles fósiles en hornos y también de maquinaria y vehículos. Por estas emisiones se pueden transformar en ácido sulfuroso ($H2SO_3$) y ácido nítrico (HNO_3), respectivamente, lo que contribuye a la lluvia ácida. Esta lluvia puede alterar la capacidad del medio ambiente para neutralizar ácidos y afectar tanto las superficies terrestres como acuáticas. En los cuerpos de agua y suelos agrícolas, las emisiones de NOx pueden enriquecer nutrientes, lo que puede llevar al crecimiento descontrolado de algas y poner en peligro la biodiversidad acuática. Además, el exceso de nitrógeno en el suelo puede desequilibrar la carga de sales nutrientes y afectar la supervivencia de ciertas especies vegetales (Cardim de Carvalho, 2001).

Las emisiones anteriores aunadas a otras emitidas por la industria del cemento, contribuyen significativamente al cambio climático y a la contaminación atmosférica, representando

alrededor del 38% de las emisiones globales de acuerdo con el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (Echeverría, 2022).

Además, dentro del proceso de fabricación de cemento se emite monóxido de carbono, pequeñas cantidades de compuestos orgánicos volátiles, amoniaco, cloro, ácido fluorhídrico y cloruro de hidrógeno (Fernández y Hernández, 2008).

Las emisiones de polvo es otro de los principales problemas de las cementeras. Durante diversas etapas del proceso, como la extracción de materia prima en la cantera, la trituración de rocas para reducir su tamaño, la producción del clínker, así como en las actividades de almacenamiento, empaquetado y transporte, se libera polvo al ambiente (Enseñat, 1977).

Este polvo contiene partículas suspendidas (PM) que engloban una amplia diversidad de sustancias líquidas, sólidas o gaseosas, con distintos tamaños y composiciones. Estas partículas varían en diámetro desde 0.001 hasta aproximadamente 100 μm, llegando a dimensiones similares al grosor del cabello humano. Las partículas más grandes, con diámetros superiores a 10 μm, suelen depositarse en la nariz y la garganta, mientras que las menores de 10 μm (PM10) son inhalables y pueden penetrar en las vías respiratorias más profundas, como los bronquios y los sacos alveolares del pulmón. Dentro de la fracción inhalable, se distingue entre la fracción gruesa, con partículas de 2.5 a 10 μm (PM10-2.5), y la fracción fina, compuesta por partículas menores a 2.5 μm (PM2.5), que pueden penetrar profundamente en los pulmones (Cervantes *et al.,* 2005; Tzintzun *et al.,* 2005).

Un 7% de las partículas suspendidas liberadas por las cementeras tienen un tamaño superior a 60 μm, lo que las hace sedimentables y caen cerca de la planta, generalmente cerca de la altura de la chimenea. Cerca del 25% de estas partículas tienen un tamaño entre 1 y 10 μm y pueden ser transportadas a largas distancias. Solo el 3% restante son submicrónicas y representan el mayor riesgo para la salud cuando están altamente concentradas en el suelo, pudiendo causar neumoconiosis en individuos expuestos durante períodos prolongados (Enseñat, 1977).

El polvo liberado, junto con otras partículas finas como el hollín, puede contener elementos tóxicos como arsénico (As), aluminio (Al), calcio (Ca), cadmio (Cd), plomo (Pb), cobalto (Co), zinc (Zn), hierro (Fe) y cromo (Cr), representando una amenaza para la flora, fauna,

cuerpos de agua y la salud de los habitantes en un radio de hasta 500 metros alrededor de las plantas de producción (Hernández, 2020), pero también pueden llegar a áreas más distantes. Durante períodos de sequía, la deposición de estas partículas puede intensificarse, y aunque las lluvias pueden reducir su concentración en el aire, no las eliminan por completo, quedando depositadas en las hojas de las plantas (Dalmasso y Llera, 1997; Tzintzun *et al.,* 2005; Hernández, 2020).

Campos-Gallego et al. (2016), realizaron un estudio donde examinaron implicaciones genotóxicas de la exposición ambiental a contaminantes en residentes cercanos a la fábrica de cemento Cemex en Ensenada, Baja California en 27 casos y 24 controles adultos, con una edad promedio de 61 años, mediante un biomonitoreo. Se observó una mayor incidencia de padecimientos crónicos degenerativos, cardiovasculares y respiratorios en el grupo expuesto, además, se estableció una relación entre la distancia a la fábrica y el daño genotóxico, sugiriendo que la distancia recomendada para la construcción de viviendas alrededor de la fábrica debería ser de al menos 2000 metros.

Las fábricas de cemento también suelen ser una fuente notable de ruido, cuya intensidad puede variar dependiendo de las inversiones realizadas para reducir los decibelios emitidos. En general, el ruido constituye un desafío común asociado a esta industria, agravado por las vibraciones generadas en el suelo (Ramón, 2014). Se ha observado que el aumento del ruido tiene repercusiones significativas en la percepción acústica de diversas especies animales. Esto puede alterar sus comportamientos alimentarios, predatorios, reproductivos y la estructura de sus poblaciones, además, el ruido puede provocar cambios en la vocalización y el enmascaramiento acústico, contribuyendo a la destrucción de hábitats e induciendo la migración de especies (Zurilla, 2020).

2.4 Ejemplos de los efectos de la industria del cemento en la biodiversidad

Se han realizado estudios en diferentes países para conocer y comprender como afecta la presencia de la industria minera sobre la población y biodiversidad. Uno de ellos es el realizado por Guzmán y León (2018), quienes evaluaron la diversidad de flora y fauna en la concesión minera Congüime, Ecuador y en áreas conservadas. Registraron que la flora y fauna asociada al área de explotación, presentó cierto deterioro ambiental y a pesar de que

mantiene una gran diversidad de especies (principalmente de flora), la fauna se vio afectada al perder ciertas especies, por lo que concluyen que el ecosistema en la concesión minera sufrió perturbaciones mientras que en las áreas conservadas mantienen una mayor diversidad por la dinámica del ecosistema.

En un estudio realizado por Pellecchia y Negri (2018), se caracterizaron abejas melíferas recolectoras de contaminantes PM en dos colonias, una cercana a una fábrica de cemento y otra a varios kilómetros de distancia en Castell Arquato, Italia. Se encontró que las abejas recolectadas cerca de la planta de cemento presentaban una notable contaminación por partículas inorgánicas, principalmente óxidos e hidróxidos de hierro, debidas a la acumulación de polvo, mientras que las abejas a varios kilómetros de distancia mostraban menos contaminación, aunque también se detectaron partículas inorgánicas en ellas. Este hallazgo sugiere una mayor contaminación por PM de origen tanto natural como antropogénico en las abejas cercanas a la fábrica de cemento en comparación con las abejas más alejadas de la fuente de emisión.

Un ejemplo del impacto en la pérdida de biodiversidad a causa de las cementeras en México es el reportado por González-Romero y Rizo-Aguilar (2012), como parte del monitoreo ecológico de una cantera rehabilitada por Holcim Apasco. Realizaron un estudio en el cerro Buenavista y la cantera Cuautlapan, Ixtaczoquitlán, Veracruz, para comparar ambos sitios. En el cerro se muestrearon cinco ambientes naturales y transformados antes de la rehabilitación (1995-1996) y en la cantera se muestrearon nueve áreas de rehabilitación (1999-2000), dos de ellas reforestadas. Para la obtención de los datos, se utilizaron métodos directos, indirectos y se acudió a registros bibliográficos. Encontraron un total de 113 especies (13 anfibios, 50 reptiles y 50 mamíferos) para la zona de Orizaba y 70 especies en el trabajo de campo (15 anfibios, 20 reptiles y 35 mamíferos), 53 en las zonas naturales y 43 en la zona rehabilitada. Concluyeron que se perdió alrededor del 53% de las especies debido a la transformación de la vegetación original debido a gran medida a las actividades propias de la cantera.

Para Hidalgo, Carrasco-Gallegos et al. (2017) analizaron entre marzo de 2015 y febrero de 2016 cómo la contaminación de las cementeras afecta a las comunidades urbanas cercanas en el municipio de Huichapan. Mediante simulaciones semanales que consideraron la altura

y velocidad de deposición, se evaluó el alcance de la dispersión de los materiales contaminantes emitidos por la cementera y encontraron que la deposición de los materiales emitidos por la planta, tiene un alcance de hasta aproximadamente 15 kilómetros de radio hacia todas las direcciones y, son las localidades más cercanas a la cementera las que constantemente están expuestas a los materiales emitidos al igual que las áreas cultivadas u agrícolas, acumulando constantemente diferentes proporciones de deposición de dichos materiales emitidos por las cementeras.

En el Valle del Mezquital, un área de importancia ecológica, las operaciones mineras asociadas con la llegada de la cementera Santa Anita a Santiago de Anaya, a finales de 2011, generaron varios impactos negativos locales, pues ocuparon más de 372 hectáreas en el municipio, consideradas de importancia ecológica, lo que resultó en la devastación de la flora y fauna local como magueyes, biznagas, palmas, nopales y garambullos, así como la desaparición de 100 mil árboles y otras especies amenazadas. Además, en la zona se identificaron 103 especies de mamíferos, de las cuales cinco están en peligro de extinción. Se sabe que las especies botánicas que fueron removidas, no fueron reubicadas, solo se dejaban a lado de las carreteras (Gómez, 2012).

Hernández (2020) realizó encuestas a los habitantes de Atotonilco de Tula y Apaxco de Ocampo con el fin de evaluar su percepción respecto a la presencia de cementeras en sus municipios y determinar si estas actividades afectan su salud o tienen impactos en el ecosistema. Los resultados revelaron que tanto los encuestados como sus conocidos manifestaron experimentar diversos malestares físicos e incluso enfermedades graves, como problemas respiratorios, abortos, intoxicaciones de diferentes grados y afecciones cardíacas, entre otros. Además, se observó una percepción general de alteración y degradación del entorno local, esto sugiere que la presencia de las cementeras podría ser potencialmente perjudicial para la salud humana, así como para la flora y fauna asociadas, generando consecuencias posiblemente irreversibles.

2.5 Mariposas diurnas como bioindicadores

Las mariposas diurnas pertenecen al orden Lepidoptera y a la superfamilia Papilionoidea. La taxonomía de las mariposas diurnas incluye a siete familias: Papilionidae, Hedylidae, Hesperiidae, Pieridae, Riodinidae, Lycaenidae y Nymphalidae (Van Nieukerken *et al.,* 2011)

y representan el segundo grupo con mayor número de especies registradas a niel mundial (Guerrero, 2019). Llorente-Bousquets et al. (2014) documentan 1,683 especies de mariposas diurnas en México de las cuales 235 son endémicas para el país y la proporción por familia es la siguiente: Riodinidae (16.29%), Pieridae (12.98%), Nymphalidae (11.86%), Papilionidae (6.3%), Lycaenidae (5.27%).

Las mariposas se utilizan comunmente como bioindicadoras de la calidad ambiental, entre otras características, por su sensibilidad a las variaciones climáticas y sus interacciones con las plantas. Su presencia o ausencia refleja los efectos de cambios en el hábitat, alteraciones climáticas y modificaciones en la composición de la biota asociada a una comunidad, permitiendo detectar posibles perturbaciones ambientales que ponen en riesgo la biodiversidad de los ecosistemas (Orta *et al.,* 2022).

Meléndez-Jaramillo et al. (2021), utilizaron a las mariposas diurnas como indicadores ambientales en un entorno urbano la Zona Metropolitana de Monterrey, donde analizaron la riqueza, abundancia y diversidad de estas mariposas considerando un gradiente de contaminación atmosférica y diferentes estaciones. Identificaron variaciones significativas en la riqueza y abundancia entre los sitios, observando una disminución en la diversidad en áreas con mayores niveles de contaminación, y encontraron diferencias estacionales en la abundancia de especies.

Legal et al. (2020) investigaron si la dinámica de la comunidad de mariposas a lo largo de las etapas sucesionales indicaba un retorno a la composición de referencia, representada por la zona más conservada. Descubrieron que el proceso de regeneración pasiva y recuperación del bosque seco tropical mexicano lleva más de 25 años, ya que prácticamente ninguna de las mariposas presentes en su zona de referencia conservada estaba presente en su área de estudio de 25 años.

Orta et al. (2022) realizan una revisión de mariposas diurnas consideradas bioindicadoras ecológicas en México, lo que facilitó su agrupación. Rodríguez (2021), quien además de identificar a mariposas con potencial de bioindicador, encontró que los sitios con alta o moderada actividad humana y una fuente de agua intermitente o permanente, registran mayor diversidad alfa, en contraste a los sitios con alta o muy alta actividad humana y con disponibilidad de agua de forma estacional, presentando valores de diversidad más bajos. Los

sitios que comparten características relacionadas con actividades humanas, presencia de agua y son cercanos entre sí, son similares.

2.6 Estudios de los impactos de la industria minera sobre lepidópteros

No existen estudios donde se evalúe directamente la diversidad de mariposas diurnas en áreas con presencia de cementeras, sin embargo, existen algunos donde se ha evaluado en laboratorio los impactos de la industria minera en lepidópteros, principalmente en larvas.

En el estudio realizado por Vanderstock et al. (2019), se investigó el efecto del polvo de carbón en el comportamiento y la supervivencia del insecto herbívoro *Helicoverpa armigera* Hübner, 1805 (Lepidoptera: Noctuidae) en hojas de tomate contaminadas (*(Lycopersicon esculentum* Mill., 1768*)*. Se encontró que el consumo de polvo de carbón aumentó la mortalidad de las larvas, pero no afectó su desarrollo. A pesar de las implicaciones a largo plazo para la supervivencia, las larvas no ajustaron su comportamiento alimentario. En contraste, las larvas recién nacidas evitaron establecerse en hojas contaminadas con polvo de carbón. La disminución de la supervivencia en una etapa de vida de los insectos, sugiere que las especies que se encuentran en ecosistemas naturales y agrícolas en zonas cercanas a las minas, también pueden estar en riesgo.

Otro estudio de los efectos de la minería sobre larvas de lepidópteros, es el realizado por Osborne y Longcore (2021), quienes estudiaron el efecto del polvo de yeso sobre larvas de *Gloveria medusa* Strecker, 1898 (Lepidoptera: Lasiocampidae). El estudio se realizó para evaluar la respuesta de las larvas al polvo de yeso en cantidades que se encuentran en el ambiente a través de la exposición externa y el consumo de vegetales contaminados y encontraron que el consumo de plantas alimenticias espolvoreadas con yeso aumentó significativamente el riesgo de muerte de las larvas y en la exposición externa al yeso, la tasa de mortalidad aumentó, pero no significativamente. Con los resultados obtenidos, los autores concluyen que el polvo del yeso presente en el aire, puede afectar a las poblaciones a través de la mortalidad directa, tasas de desarrollo reducidas, pesos más bajos y periodos de desarrollo prolongados, que alteran la fenología natural de las larvas.

3. JUSTIFICACIÓN

La industria del cemento representa una de las principales fuentes de contaminación ambiental y está asociada con la pérdida de extensos terrenos forestales a través de la

destrucción y modificación de los hábitats debido a los distintos procesos que se necesitan para la elaboración de cemento, así como la emisión de distintos contaminantes, uso elevado de recursos naturales, entre otras consecuencias que degradan y perjudican al ambiente y la biodiversidad presente. Esta industria representa una fuerte y constante amenaza para el medio ambiente, siendo la biodiversidad uno de los campos menos estudiados (Álvarez, 2023; Araujo, 2023).

En el municipio de Atotonilco de Tula, la presencia de cementeras se asocia con posibles impactos negativos en la biodiversidad local. Entre las especies que podrían ser afectadas se encuentran las mariposas diurnas, un grupo ampliamente estudiado debido a su potencial como bioindicadores ecológicos por su abundancia, diversidad, manejo en campo, su estabilidad espaciotemporal, así como contar con una taxonomía bien conocida (Márquez, 2014), sin embargo, actualmente no se han realizado estudios que examinen la diversidad de mariposas en áreas con presencia de esta industria.

Por lo tanto, este estudio busca analizar la diversidad de mariposas en Atotonilco de Tula para comprender cómo la industria del cemento afecta las comunidades de lepidópteros diurnos. Al comparar la diversidad y composición de especies de mariposas en esta área con un área que mantienen mayor cobertura vegetal nativa, se podrá obtener una visión integral de cómo varían las comunidades entre un área preservada y otra afectada por la degradación y fragmentación de su vegetación nativa, debido a diversas formas de contaminación y efectos adversos en el ambiente asociados a la industria del cemento.

4. OBJETIVOS

4.1 Objetivo general

Analizar la diversidad alfa y beta de mariposas diurnas (Papilionoidea) en los alrededores de dos cementeras con diferentes distancias (cercana y lejana) y en un área de vegetación nativa, en diferentes épocas del año.

4.2 Objetivos particulares

a) Comparar la riqueza y abundancia de mariposas diurnas entre un área con vegetación nativa y áreas ubicadas a distancias de dos cementeras (cerca: vegetación perturbada; lejos:

vegetación con mayor cobertura vegetal), considerando tanto la temporada de sequía como la de lluvia, además de realizar un análisis combinado de ambas estaciones.

b) Estimar las diferencias en la composición de especies de mariposas diurnas entre un área con vegetación nativa y las áreas a distintas distancias de las cementeras, evaluando tanto de manera conjunta como por temporada.

c) Analizar la diversidad beta (recambio y anidamiento) de especies de mariposas diurnas entre el área con vegetación nativa y las áreas cercanas y lejanas a las cementeras, considerando las diferencias por temporada y en conjunto.

d) Elaborar una lista taxonómica complementaria de las mariposas diurnas que se distribuyen en Atotonilco de Tula, utilizando datos obtenidos de íNaturalistMX.

5. HIPÓTESIS

Con base en la evidencia previa que sugiere que las áreas con vegetación nativa albergan una mayor diversidad de especies en comparación con aquellas afectadas por actividades humanas como la minería (Manson *et al*., 2009), se anticipa que la riqueza y abundancia de mariposas diurnas disminuirá en las proximidades a las instalaciones de las industrias cementeras, en contraste con áreas más alejadas a las mismas y un área con vegetación nativa a una mayor distancia de las cementeras. Por lo tanto, es posible que la vegetación nativa tenga mayor riqueza de especies y exista un alto recambio de especies con respecto a las áreas cercanas a cementeras.

6. MÉTODO

6.1 Área de estudio

El área de estudio abarca dos municipios del estado de Hidalgo: Atotonilco de Tula y Ajacuba. Atotonilco de Tula, conocido por albergar industrias cementeras activas, es el municipio principal de estudio, mientras que Ajacuba, municipio vecino sin actividad de la industria cementera, se utilizó como área de control para este trabajo.

Atotonilco de Tula se localiza al sur del estado, con coordenadas 20º 00’ 26” latitud norte y 99º 13’ 14” de longitud oeste, a una altitud que varía entre 2,000 y 2,800 msnm. Limita al norte con los municipios de Atitalaquia y Ajacuba; al oeste con los municipios de Tula de

Allende y Tepeji del Río; y, al sur y este, con los municipios de Tequixquiac y Apaxco, estado de México. Su superficie es de 122.22 km^2. Presenta un clima templado, subhúmedo y semiárido, con una temperatura anual de entre 12° C y 17°C, precipitación media de 560 milímetros por año con un periodo de lluvias en el mes de mayo a septiembre. Presenta lomeríos y llanuras con flora formada principalmente por matorrales espinosos, magueyes y cactus (SEMARNAT. CONAFOR., 2015; Gobierno del Estado de Hidalgo, 2017).

Por otra parte, Ajacuba se localiza al suroeste del Estado de Hidalgo, sus coordenadas; 20° 05’ 31” latitud norte y 99° 07’20” longitud oeste, con una altitud entre 2000 y 2900 msnm. Colinda al norte con los municipios de Mixquiahuala de Juárez, Francisco I. Madero y San Salvador; al este con los municipios de Actopan y San Agustín Tlaxiaca; al sur con el municipio de San Agustín Tlaxiaca, el estado de México y los municipios de Atotonilco de Tula y Atitalaquia; al oeste con los municipios de Atitalaquia, Tetepango y Mixquiahuala de Juárez. Cuenta con una superficie de 238.80 km^2. Presenta un clima semiseco templado y templado subhúmedo con lluvias de marzo a noviembre. Cuenta con una flora caracterizada principalmente por matorrales espinosos, así como cactus, nopales, magueyeras y escasos bosques de encino (Gobierno del Estado de Hidalgo, 2017).

6.1.1 Determinación de la cobertura vegetal de Atotonilco de Tula y Ajacuba

Para determinar las áreas de colecta de mariposas, se evaluó la cobertura vegetal de Atotonilco de Tula y Ajacuba mediante la georreferenciación de una imagen de Google Earth (Fig. 1).

Figura 1. Localización de los municipios de Atotonilco de Tula y Ajacuba, estado de Hidalgo. Elaboración propia a partir de imagen Google Earth.

Se seleccionaron cinco ubicaciones estratégicas con acceso público dentro del área de estudio, las cuales se identifican en el texto de acuerdo con la Tabla 1. Cuatro de estas se localizaron en las inmediaciones de las cementeras: dos en proximidad cercana, denominadas Cem_A (aproximadamente 800 m) y For_A (aproximadamente 1500 m), caracterizadas por vegetación perturbada; y dos más alejadas, Cem_B (aproximadamente 4000 m) y For_B (aproximadamente 2000 m), que conservan una mayor cobertura de vegetación nativa en comparación con las más cercanas. El último sitio se eligió en un área de Ajacuba que preserva su vegetación nativa, veg_nat (Fig. 2).

Tabla 1. Áreas de muestreo con sus acrónimos para su identificación en el texto.

Municipio	**Sitio de colecta**	**Acrónimo**
Atotonilco de Tula	Distancia cercana de Cemex	Cem_A
	Distancia lejana a Cemex	Cem_B
	Distancia cercana a Fortaleza	For_A
	Distancia lejana a Fortaleza	For_B
Ajacuba	Vegetación nativa	Veg_nat

La elección de las áreas se verificó en campo utilizando coordenadas geográficas. Posteriormente, la información fue digitalizada y se generaron buffers con un diámetro de 1 km, definidos de manera arbitraria para asegurar una cobertura significativa del área de muestreo. Estos procedimientos se realizaron empleando el software QGIS.

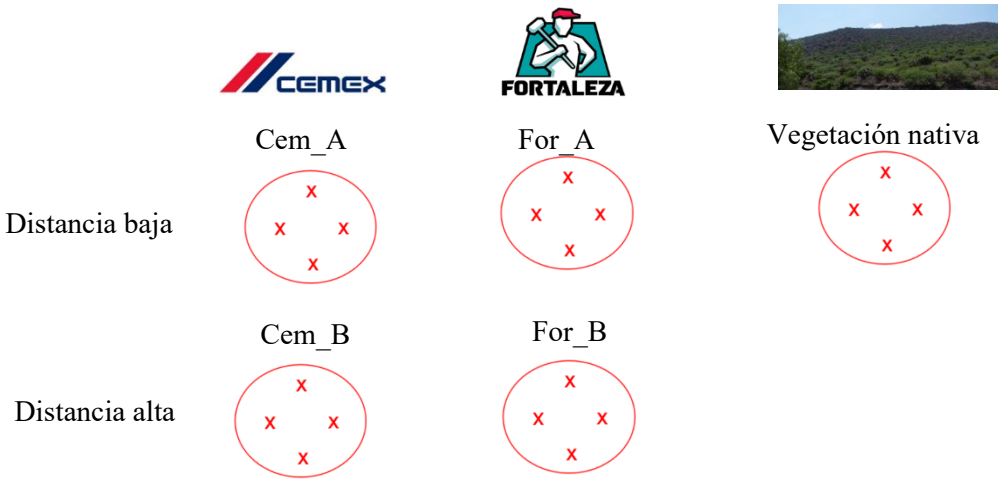


Figura 2. Representación de las áreas de muestreo a una distancia cercana (_A) y lejana (_B) de las cementeras Cemex (Cem) y Fortaleza Planta Tula (For) en Atotonilco de Tula y un área con vegetación nativa (Veg_nat) en el municipio de Ajacuba. En la figura, el buffer de 1 km se indica con

un círculo rojo, mientras que los transectos establecidos durante los muestreos en campo están marcados con una ‘‘x’’ roja.

6.2 Obtención de datos de campo

6.2.1 Colecta de mariposas diurnas

Las visitas a las áreas de muestreo (Fig. 3) se llevaron a cabo mensualmente durante el período de sequía, en los meses de abril y mayo, y lluvia en septiembre y octubre de 2023.

Figura 3. Áreas de colecta; a) Veg_nat en Ajacuba, b) Cem_A, c) Cem_B, d) For_A y e) For_B. (© Fotos: Fátima Cruz Márquez).

Para la recolección de mariposas diurnas, se estableció un transecto de 100 metros de longitud por 10 metros de ancho en cada visita, contemplando todas las direcciones cardinales: norte, sur, este y oeste dentro del buffer. Cuatro personas participaron en el esfuerzo de colecta

(Fig. 4), se cubrió un total de cuatro áreas en un día en la región de Atotonilco de Tula y el último para el día siguiente, en Ajacuba a cargo de una persona.

El muestreo se llevó a cabo desde las 8:30 hasta las 13:30 horas, en condiciones soleadas. La captura de las mariposas adultas fue directa, utilizando redes entomológicas aéreas. Cada individuo capturado fue inmovilizado con las alas orientadas hacia arriba y posteriormente se sacrificaron mediante presión digital en el tórax, para su preservación y transporte en sobres de papel glassine, donde se incluye los datos de la recolecta (hora, coordenadas, sitio de colecta). Los ejemplares fueron transportados al laboratorio de Ecología de Comunidades del Centro de Investigaciones Biológicas (CIB) de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH), donde se contaron, identificaron, y montaron para su depósito en el mismo laboratorio.

En cada sitio se hizo un total de veinte horas-persona como esfuerzo de muestreo, que se completó a lo largo de las visitas mensuales. Los individuos se colectaron bajo el permiso de colecta científica Nº SGPA/DGVS/03646/23, emitido por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).

Figura 4. Tres de los cinco colectores de mariposas diurnas del presente estudio con red entomológica. (© Foto: Víctor Alejandro Valle Tapia).

6.3 Trabajo de laboratorio

Los ejemplares capturados se sometieron al procedimiento de cámara húmeda por un período mínimo de 24 horas para su hidratación y posterior montaje. Una vez obtenido el estado adecuado de los individuos para su montaje, se pincharon en el centro del tórax con un alfiler entomológico número cero (0), uno (1) o dos (2), dependiendo del tamaño del tórax y posteriormente se montaron en láminas de icopor, las cuales poseen un canal triangular en el centro donde se fijan la cabeza, el tórax y abdomen del ejemplar; posterior a ello, se procedió a extender las alas con ayuda de pinzas de punta plana sin estrías y alfileres que sostienen tiras de papel milano que protegen las alas por encima. Cada uno de los ejemplares fue etiquetado siguiendo el procedimiento de Ospina, (2014), donde incluye los siguientes datos de colecta; localidad, colector, fecha de colección y coordenadas geográficas.

Para la identificación de ejemplares se utilizó la guía Butterflies of Mexico and Central America (Glassberg, 2018), y se recurrió a la comparación con ejemplares tipo con la base de datos www.butterfliesofamerica.com (Warren, 2012) posteriormente, el ID de cada ejemplar se confirmó con ayuda del Dr. José Luis Salinas-Gutiérrez, de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

6.4 Obtención de datos mediante íNaturalistMX

Para complementar la información sobre las especies de mariposas diurnas presentes en Atotonilco de Tula, se desarrolló un proyecto específico en la base de datos íNaturalistMX titulado ‘‘Mariposas diurnas de Atotonilco de Tula’’ (iNaturalist community, 2023). Este proyecto tiene como objetivo reunir y descargar registros existentes de estas especies, considerando que, debido a su movilidad y patrones variables de actividad, es posible que no todas las especies hayan sido registradas durante las expediciones de campo.

La elección de íNaturalistMX se fundamenta en su capacidad como red social para construir un banco de imágenes de la biodiversidad en México. Esta plataforma fomenta la colaboración ciudadana, permitiendo a los usuarios explorar sus entornos locales y contribuir con datos valiosos que enriquecen el conocimiento científico.

Para Ajacuba, no se cuenta con registros de especies de mariposas diurnas en íNaturalistMX hasta el momento de la obtención de datos, por lo que todas las especies colectadas en campo, representan los primeros registros para el municipio.

Es importante destacar que esta información no se utilizó en los análisis, sino que fue empleada exclusivamente para identificar las especies potenciales que no fueron colectadas en campo y para la discusión. El proyecto creado puede ser consultado mediante la siguiente liga: https://mexico.inaturalist.org/projects/mariposas-diurnas-de-atotonilco-de-tula

6.5 Análisis de datos

6.5.1 Diversidad alfa

Se evaluó la completitud del inventario de especies de las distintas áreas de estudio, es decir, las distancias cercanas, lejanas a las cementeras y el área con vegetación nativa durante las temporadas de sequía y lluvia, así como un análisis conjunto de todas las áreas en ambas estaciones. Para este propósito, se utilizó el índice no paramétrico basado en la incidencia de especies (presencia-ausencia) Bootstrap, calculado mediante el software EstimateS 9.1.0 (Colwell, 2013).

El estimador Bootstrap se basa en la proporción de unidades de muestreo que contienen cada especie (denominada ‘‘pj’’), y se calcula de la siguiente manera:

$$Bootstrap = S + \Sigma\,(1 - pj)$$

El procedimiento implica la toma de muestras aleatorias con reemplazo de la muestra original y el cálculo del estimador o estadística de interés en cada una de estas muestras. Repitiendo este proceso en numerosas ocasiones, se obtiene una distribución empírica de los valores del estimador o estadística, lo que permite calcular intervalos de confianza y evaluar la variabilidad de la estimación sin necesidad de hacer suposiciones paramétricas (Moreno, 2001). Se eligió Bootstrap debido a que enfatiza el análisis de especies únicas o raras, que a menudo se encuentran en áreas conservadas.

Se estimó y comparó la diversidad alfa entre distancias a las cementeras y el área con vegetación nativa considerando la integración de ambas temporadas y por separado. La evaluación de estos resultados se llevó a cabo mediante los números de Hill (Jost, 2006) del

orden 0 (q^0), que equivale a la riqueza de especies, y el orden 1 (q^1), con base en el índice de Shannon, que pondera cada especie según su abundancia en la comunidad.

Los valores de q^0 se contrastaron mediante interpolación (comparación de datos observados) y extrapolación en el cual se duplica el número de muestras para estimar la diversidad más allá del intervalo de observación, proporcionando una estimación de lo que podríamos esperar si se realizaran más muestreos. El procedimiento se realizó con el programa en línea iNEXT (Chao *et al.,* 2016).

Los valores de q se representaron en curvas de rarefacción con interpolación e intervalos de confianza (IC) con un nivel del 95%. Estos IC se utilizaron para comparar las diferencias entre las áreas cercanas, lejanas a las cementeras y el área con vegetación nativa en ambas épocas del año. La ausencia de traslape en los IC indica la presencia de diferencias significativas (Cumming *et al.,* 2007).

Asimismo, se elaboraron curvas de rango-abundancia las cuales se construyen al ordenar las especies de cada unidad de muestreo según su abundancia, representada en escala logarítmica 10, lo que permite visualizar fácilmente las especies más abundantes y las diferencias de abundancia entre ellas (Magurran, 2004).

6.5.2 Composición de especies

Para evaluar los cambios en la composición de especies de mariposas diurnas entre las áreas cercanas, lejanas a las cementeras y vegetación nativa en ambas temporadas y por separado, se realizó un análisis de varianza multivariado permutacional (PERMANOVA), usando el índice de similitud Bray-Curtis, el cual compara tanto el número de especies compartidas como sus abundancias absolutas entre muestras de igual tamaño. Lo anterior se evaluó mediante el empleo del software PRIMER v7, y los resultados se presentan mediante un escalamiento multidimensional (MDS por sus siglas en inglés) usando Bootstrap para representar las elípses (Clarke y Gorley, 2015).

6.5.3 Diversidad beta

Para evaluar la disimilitud entre distancias a las cementeras y el área con vegetación nativa considerando ambas temporadas y por separado, se calculó la diversidad beta empleando la metodología propuesta por Baselga (2010), donde divide la diversidad beta en dos

componentes: recambio, que implica la sustitución de especies debido a factores espaciales e históricos, y anidamiento, que se refiere a diferencias en la riqueza de especies. Estos componentes enriquecen el análisis al considerar la variación en la composición de especies. Para obtener la información anterior, se empleó el programa R 4.3.1 (R Development Core Team, 2023) y el script de Carvalho et al. (2012, 2013).

Calderón-Patrón y Moreno (2019) indican que, en la naturaleza, el recambio de especies puede indicar una selección de especies afectada por el mismo medio o por procesos de dispersión, mientras que el anidamiento suele asociarse con dinámicas de colonización y extinción.

6.5.4 Biocuración de las especies de mariposas diurnas obtenidas de íNaturalistMX

Mediante el proyecto creado en íNaturalistMX, los registros se descargaron y se biocuraron uno por uno mediante la selección de únicamente aquellos con identificación realizada por curadores certificados en la plataforma y con información completa como fecha de registro, coordenadas y registros sin duplicados por el mismo autor, es decir, solo se consideró una sola observación de la especie, en caso de que el autor haya subido por separado varias imágenes del mismo individuo, generando varios registros a partir de una sola observación. Lo anterior, con la finalidad de tener datos fiables. Posteriormente, se elaboró una lista en una hoja de cálculo en Excel con todos los registros que cumplieron con las especificaciones anteriores para ser tomados en cuenta en la elaboración de la lista taxonómica de mariposas diurnas presentes en el municipio de Atotonilco de Tula como información complementaria a la obtenida en campo.

7. RESULTADOS

7.1 Diversidad alfa

Se colectó un total de 369 individuos, distribuidos en seis familias, 13 subfamilias, 45 géneros y 54 especies. De este total, 69 individuos se capturaron durante la temporada de sequía, mientras que 300 en la temporada de lluvia (Tabla 2). Del total de los datos, 42 especies y 263 individuos se colectaron en Atotonilco de Tula, mientras que 24 especies y 106 en Ajacuba.

Del total de los datos, la familia mejor representada fue Hesperiidae, que incluyó cuatro subfamilias, 16 géneros y 17 especies, seguida de la familia Nymphalidae, tres subfamilias, 10 géneros y 13 especies, Pieridae, dos subfamilias, ocho géneros y 10 especies, Lycaenidae con dos subfamilias, seis géneros y ocho especies. Las familias menos representadas fueron Papilionidae una subfamilia, tres géneros y tres especies y Riodinidae, una subfamilia, dos géneros y tres especies colectadas.

En Atotonilco de Tula, la familia con mayor número de especies fue Nymphalidae con 12, Hesperiidae con 11, Pieridae con 10, Lycaenidae con seis, Papilionidae con dos y Riodinidae con una especie (Tabla 2).

En cuanto a la riqueza y abundancia por área de colecta, en el área cercana a la cementera Cemex (Cem_A), la familia con mayor riqueza en la temporada de sequía fue Lycaenidae con dos especies; *Echinargus isola* (Reakirt, [1867]) y *Leptotes marina* (Reakirt, 1868), mientras que para la temporada de lluvia fue Pieridae con siete especies; *Abaeis mexicana mexicana* (Boisduval, 1836), *A. salome jamapa* (Reakirt, 1866), *Nathalis iole iole* Boisduval, 1836, *Pontia protodice* (Boisduval & Le Conte, [1830]), *Pyrisitia westwoodii* (Boisduval, 1836) y *Zerene cesonia cesonia* (Stoll, 1790), seguida de la familia Nymphalidae, con cinco especies; *Chlosyne lacinia lacinia* (Geyer, 1837), *Dione vanillae incarnata* (Linnaeus, 1758), *Euptoieta hegesia meridiania* (Stichel, 1938), *E. claudia daunius* ((Herbst, 1798), *Leptophobia aripa elodia* (Boisduval, 1836) (Tabla 2).

En el área lejana de la cementera Cemex (Cem_B), Lycaenidae obtuvo la mayor riqueza en la temporada de sequía con dos especies; *Echinargus isola* y *Leptotes marina*, mientras que en la temporada de lluvia fue Pieridae con siete especies; *Abaeis mexicana mexicana*, *Leptophobia aripa elodia*, *Nathalis iole iole*, *Phoebis marcellina* (Cramer, 1777), *Pontia protodice*, *Pieris rapae rapae* (Linnaeus, 1758) y *Zerene cesonia cesonia*, seguido de Nymphalidae también con siete especies; *Anthanassa texana* (W. H. Edwards, 1863), *Chlosyne lacinia lacinia*, *Danaus gilippus thersippus* (H. Bates, 1863), *Dione moneta poeyii* (A. Butler, 1873), *D. vanillae incarnata*, *Euptoieta hegesia meridiania*, *E. claudia daunius* (Tabla 2).

Para el área cercana a la cementera Fortaleza (For_A), la familia con mayor número de especies en sequía fue Lycaenidae, dos especies; *Echinargus isola* y *Leptotes marina* y en lluvia Nymphalidae con seis especies; *Anthanassa texana*, *Danaus gilippus thersippus*,

Dione moneta poeyii, *D. vanillae incarnata*, *Euptoieta hegesia meridiania* y *Vanessa annabella* (W. D. Field, 1971) (Tabla 2).

Lycaenidae tuvo mayor número de especies en el área lejana de la cementera Fortaleza (For_B) en la temporada de sequía con cuatreo especies; *Echinargus isola*, *Leptotes marina*, *Strymon istapa istapa* (Reakirt, [1867]) y *S. melinus* (Hübner, [1813]) y en lluvia, Hesperiidae; *Ancyloxypha arene*, *Atalopedes huron* (Boisduval, 1852), *Autochton caballo* (Grishin, 2023), *Codatractus arizonensis* (Skinner, 1905), *Gesta funeralis* (Scudder & Burgess, 1870), *Lon vitellina* (Herrich-Schäffer, 1869) y Pieridae; *Leptophobia aripa elodia*, *Nathalis iole iole*, *Pieris rapae rapae*, *Pontia protodice*, *Pyrisitia nise nelphe* (R. Felder, 1869), *P. westwoodi* y Nymphalidae; *Anthanassa texana*, *Danaus eresimus montezuma* (Talbot, 1943), *Dione moneta poeyii*, *Heliconius charithonia vazquezae* (W. Comstock & F. Brown, 1950), *Nymphalis antiopa antiopa* (Linnaeus, 1758), *Phyciodes graphica graphica* (R. Felder, 1869), con seis especies cada una (Tabla 2).

Para Ajacuba en el área con vegetación nativa (veg_nat), la familia con mayor riqueza de especies en ambas temporadas de muestreo fue Hesperiidae con siete, Lycaenidae con cinco, Pieridae y Nymphalidae con cuatro, Riodinidae con tres y Papilionidae con una especie.

Para esta área, en la temporada de sequía, Lycaenidae tuvo mayor riqueza con cuatro especies; *Brephidium exilis exilis*, *Echinargus isola*, *Leptotes marina* y *Ministrymon leda* (W. H. Edwards, 1882). Para la temporada de lluvia fue Hesperiidae con siete especies; *Ancyloxypha arene*, *Burnsius* sp, *Codatractus arizonensis*, *Chiothion georgina georgina* (Reakirt, 1868), *Heliopetes laviana laviana* (Hewitson, 1868), *Pholisora mejicanus* (Reakirt, [1867]) y *Systasea pulverulenta* (R. Felder, 1869) (Tabla 2).

Tabla 2. Lista de mariposas diurnas de los sitios de estudio en Atotonilco de Tula y Ajacuba para la temporada seca y de lluvia; S= número de especies, n: número de individuos por especie y A: abundancia., *: nuevos registros para Atotonilco de Tula. Entre paréntesis se incluye con una letra distinta a las especies más abundantes. Cem_A y For_A: áreas cercanas a las cementeras Cemex y Fortaleza, Cem_B y For_B: áreas lejanas a las cementeras Cemex y Fortaleza, Veg_nat: área con vegetación nativa. Las mariposas están organizadas según el número de especies por familia y subfamilia, siguiendo el acomodo presentado por Palacios-Mayoral et al. (2018) y la actualización de especies en la base de datos www.butterfliesofamerica.com (Warren *et al.,* 2024).

	Atotonilco de Tula								Ajacuba		
	Cem_A		Cem_B		For_A		For_B		Veg_nat		A
Familia/Subfamilia/Especie	Seca	lluvia	Seca	lluvia	Seca	lluvia	Seca	lluvia	Seca	lluvia	n
Hesperiidae (S=16; n=39)											
Eudaminae (S=2; n=8)											
**Autochton caballo*	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
**Codatractus arizonensis*	0	0	0	0	0	0	0	1	0	6	7
Hesperiinae (S=5; n=19)											
**Ancyloxypha arene* (F)	0	5	0	3	0	0	0	2	0	1	11
**Atalopedes huron*	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
Oarisma minima	0	1	0	2	0	2	0	0	0	0	5
**Hylephila phyleus phyleus* (Drury, 1773)	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
**Lon vitellina*	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
Heteropterinae (S2=; n=2)											
**Piruna* sp1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
**Piruna* sp2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
Pyrginae (S=7; n=10)											
Burnsius sp	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Chiothion georgina georgina	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Gesta funeralis	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	2
Heliopetes laviana laviana	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Pholisora mejicanus	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
**Staphylus tepeca* (E. Bell, 1942)	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
Systasea pulverulenta	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3
Lycaenidae (S=8; n=144)											
Polymmatinae (S=4; n=131)											
Brephidium exilis exilis (V)	0	0	0	0	0	1	0	0	1	17	19
Echinargus isola (A)	6	4	3	4	14	0	4	0	6	1	42
Icaricia lupini texanus	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	2
Leptotes marina (B)	2	5	2	11	5	7	4	14	7	11	68
Theclinae (S=4; n=13)											
Ministrymon leda	0	0	0	0	0	0	0	0	4	2	6
Strymon cestri (Reakirt, [1867])	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Strymon istapa istapa	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
Strymon melinus	0	0	0	2	0	2	0	1	0	0	5
Nymphalidae (S=9; n=39)											
Danainae (S=2; n=4)											
**Danaus eresimus montezuma*	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
Danaus gilippus thersippus	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	3

Heliconiinae (S=5; n=18)											
Dione moneta poeyii	0	0	0	1	0	2	0	1	0	0	4
Dione vanillae incarnata	0	2	0	2	1	1	0	0	0	0	6
Euptoieta claudia daunius	0	1	0	3	0	0	0	0	0	0	4
Euptoieta hegesia meridiania	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	3
Heliconius charithonia vazquezae	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
Nymphalinae (S=6; n=33)											
Anthanassa texana (K)	0	0	1	2	0	2	0	10	3	7	25
Chlosyne lacinia lacinia	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	2
Nymphalis antiopa antiopa	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
**Phyciodes graphica graphica*	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2	3
**Microtia elada elada* (Hewitson, 1868)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Vanessa annabella	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
Papilionidae (S=3; n=4)											
Papilioninae (S=3; n=4)											
Battus philenor philenor	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
Heraclides pharnaces	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	2
Papilio polyxenes asterius (Stoll, 1782).	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Pieridae (S=11; n=121)											
Coliadinae (S=7; n=89)											
Abaeis mexicana mexicana	0	3	0	1	0	0	0	0	0	0	4
**Abaeis salome jamapa*	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Nathalis iole iole (C)	0	8	0	29	0	8	1	2	0	12	60
Phoebis marcellina	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
**Pyristia nise nelphe*	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
**Pyristia westwoodi*	0	1	0	0	0	0	0	4	0	0	5
Zerene cesonia cesonia (E)	0	3	0	8	0	3	0	0	0	3	17
Pierinae (S=4; n=32)											
Archonias nimbice nimbice	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2
Leptophobia aripa elodia (D)	0	1	0	2	0	5	0	5	0	5	18
**Pieris rapae rapae*	0	0	0	1	0	0	0	2	0	0	3
Pontia protodice (G)	0	2	0	3	1	2	0	1	0	0	9
Riodinidae (S3=; n=4)											
Riodininae (S3=; n=4)											
Calephelis sp1 (Grote & Robinson, 1869)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Calephelis sp2 (Grote & Robinson, 1869)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
**Lasaia maria anna* (Clench, 1972)	0	0	0	0	0	0	0	1	3	0	4
										Total:	369

La completitud del inventario total (distancias cercanas, lejanas y vegetación nativa), considerando ambas temporadas fue del 84%. Durante la temporada de sequía la completitud de las áreas cercanas a las cementeras alcanzó el 88.88%, mientras que para las distancias lejanas a las cementeras fue del 86.95%, y de un 100% para el área de vegetación nativa (Tabla 3). Por otra parte, en la temporada de lluvia se registró una disminución en la completitud del inventario de las distancias cercanas a las cementeras alcanzando un 85.47%, 84.84% para las distancias lejanas a las cementeras, mientras que el 100% se mantuvo en la vegetación nativa. Aunque los valores de completitud superan el 80%, un esfuerzo de muestreo adicional podría incrementar el número de especies y obtener el 100%.

Tabla 3. Valores de diversidad según el orden q^0 y q^1, así como la abundancia y completitud de las áreas de estudio. Se incluye las áreas cercanas a las cementeras Cemex (Cem_A) y Fortaleza (For_A), así como las áreas lejanas (Cem_B y For_B), y el área con vegetación nativa (Veg_nat), para las temporadas de sequía y lluvia.

Resultados generales	q^0	q^1	**Abundancia**	**Bootstrap**
Distancias cercanas a las cementeras	25	16.47	111	25 (100%)
Distancias lejanas a las cementeras	36	17.00	152	36 (100%)
Veg_nat	24	14.03	106	24 (100%)
Temporada de sequía	q^0	q^1	**Abundancia**	**Bootstrap**
Distancias cercanas a las cementeras	4	2.30	29	4.5 (89%)
Distancias lejanas a las cementeras	5	3.20	16	5.75 (87%)
Veg_nat	6	5.24	24	6 (100%)
Temporada de lluvia	q^0	q^1	**Abundancia**	**Bootstrap**
Distancias cercanas a las cementeras	25	12.70	82	29.25 (85 %)
Distancias lejanas a las cementeras	35	12.00	136	41.25 (85%)
Veg_nat	23	13.57	82	23 (100%)

Los resultados de la diversidad alfa empleando los números de Hill q^0 y q^1 para las distancias cercanas, lejanas a las cementeras y el área con vegetación nativa, indican que no existen diferencias significativas entre veg_nat y las distancias cercanas a las cementeras tanto en los datos inter y extrapolados (Fig. 4a). En cuanto al orden q^1, se observan diferencias significativas entre el área con vegetación nativa y las distancias cercanas a las cementeras

durante la temporada de sequía, lo que sugiere una mayor diversidad ecológica en el área con vegetación nativa (Fig. 5b).

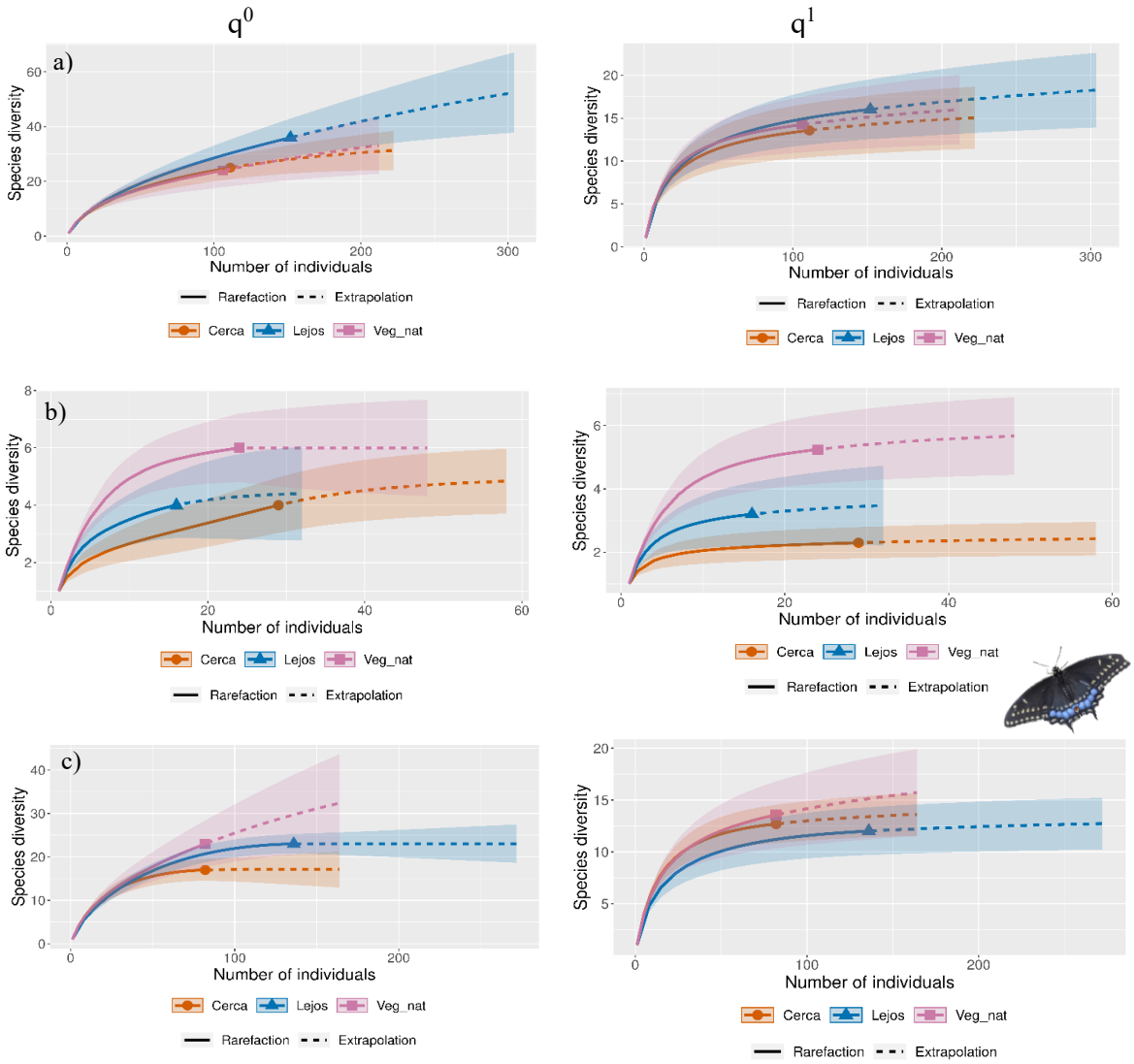


Figura 5. Comparación del orden q^0 y q^1 entre las áreas cercanas a las cementeras Cemex (Cem_A) y Fortaleza (For_A), así como en las áreas lejanas (Cem_B y For_B), y el área con vegetación nativa (Veg_nat), para a) ambas temporadas, b) la temporada de sequía y c) la temporada de lluvia.

En el análisis del orden q^0 y q^1 por distancia cercana y lejana de cada cementera en ambas temporadas (sequía y lluvia), no se encontraron diferencias significativas (Fig. 6).

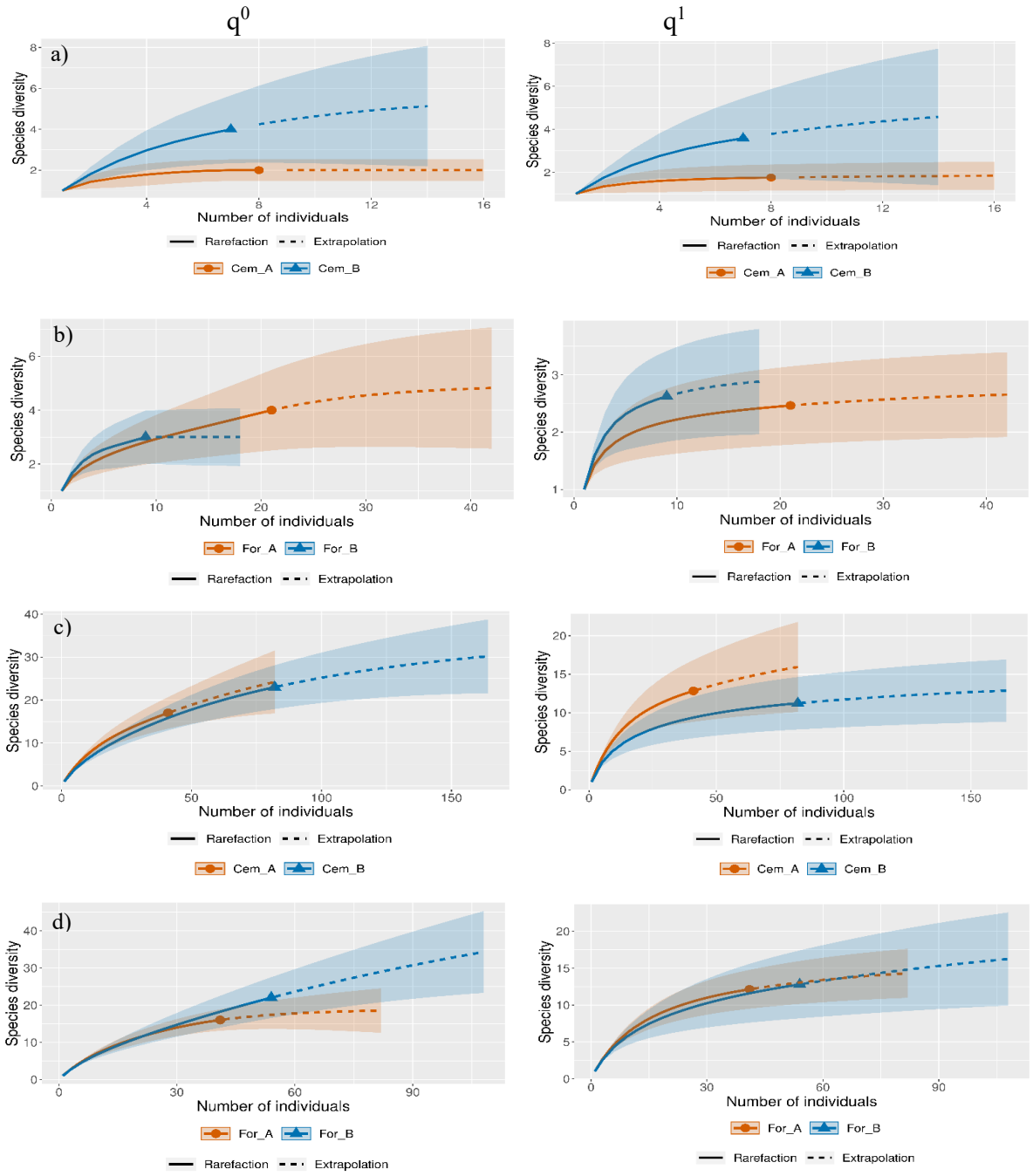


Figura 6. Comparación del orden q^0 y q^1 entre a) las áreas de las cementera Cemex (Cem_A y Cem_B) en temporada de sequía, b) ambas áreas a Fortaleza (For_A y For_B) en temporada de sequía, c) ambas áreas a Cemex (Cem_A y Cem_B) en temporada de lluvia y c) ambas áreas a Fortaleza (For_A y For_B) en temporada de lluvia.

De acuerdo a las gráficas de rango-abundancia para los totales de las áreas analizadas (vegetación nativa, cerca y lejos de cementeras) (Fig. 7), se aprecia que *Echinargus isola* (A)

con 24 individuos, *Leptotes marina* (B) 19 y *Nathalis iole iole* (C) 16, son las especies que presentaron mayor número de individuos en las distancias cercanas a las cementeras en la inclusión de ambas temporadas, mientras que para las distancias lejanas a las cementeras fueron *N. iole iole* con 32 individuos, *L. marina* 31 individuos, *Anthanassa texana* (K) 13 y *E. isola* con 11. En veg_nat *Brephidium exilis exilis* fue la especie más abundante con 18 individuos, *L. marina* con 18, *N. iole iole* 12 y *A. texana* 10. Durante la temporada de sequía se registraron pocas especies para todas las áreas de muestreo y, por ende, pocos individuos, por lo que no se realizó gráfica de rango-abundancia para esta temporada.

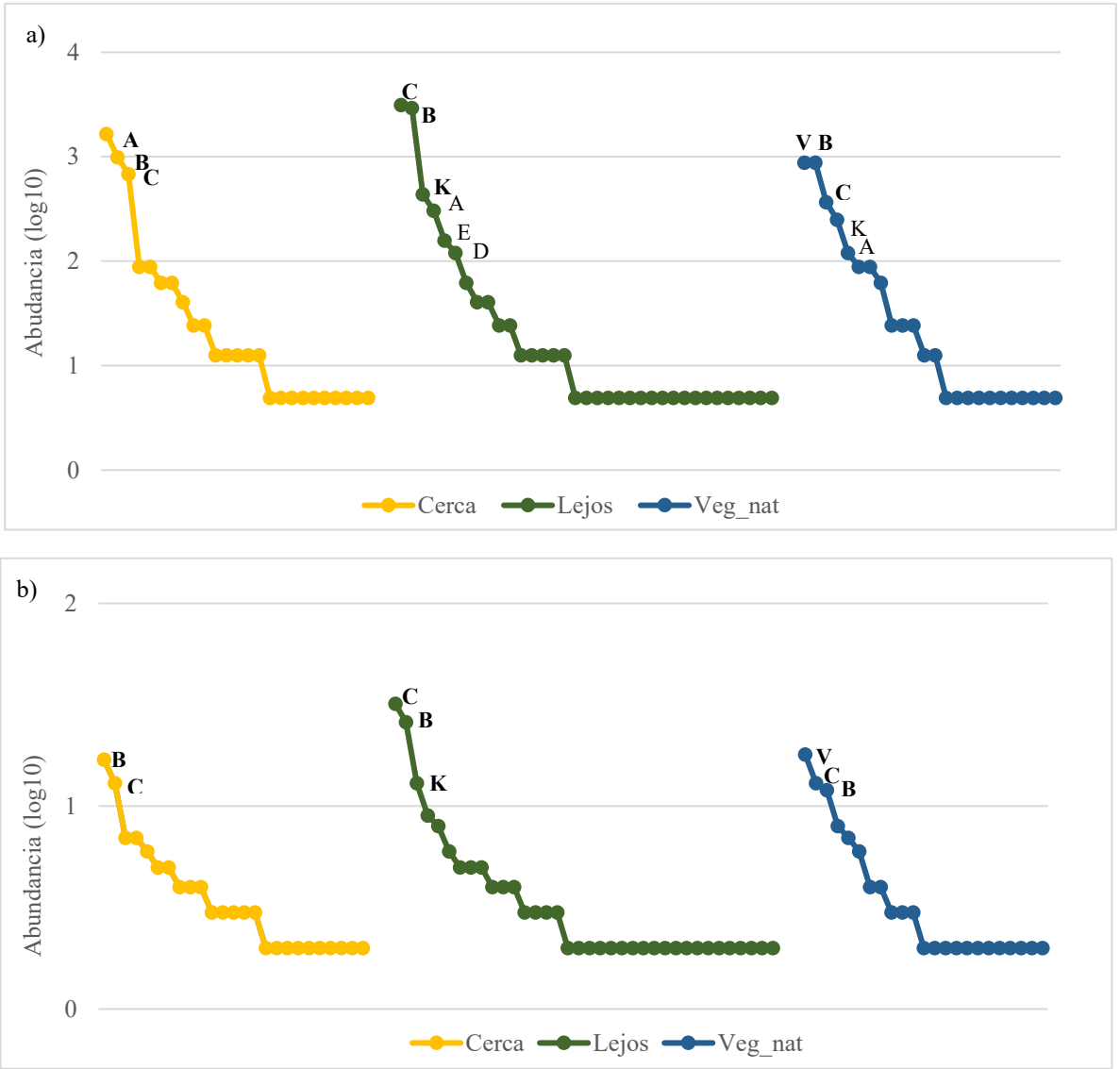


Figura 7. Gráficas de rango-abundancia de las especies de mariposas diurnas colectadas en las áreas cercanas a las cementeras (Cem_A y For_A), lejanas (Cem_B y For_B), y el área con vegetación

nativa donde: a) integración de sequía y lluvia y b) lluvia. A = *Echinargus isola*, B = *Leptotes marina*, C = *Nathalis iole iole*, D = *Leptophobia aripa elodia*, E = *Zerene cesonia cesonia*, F = *Ancyloxypha arene* G = *P. protodice*, K = *A. texana* y V = *B. exilis exilis*. Se presentan en negrita a las especies más abundantes, marcadas a partir de 1 individuo.

7.2 Composición de especies

El análisis de composición de especies indica que existen diferencias significativas entre temporadas (sequía y lluvia) para todas las áreas de estudio (Fig. 8) (F_{pseudo} = 8.3745, *df* = 1, *p* = 0.001), sin embargo, en el análisis para las distancias a las cementeras y veg_nat, no se encontraron diferencias significativas (F_{pseudo} = 0.86239, *df* = 2, *p* = 0.603) por lo que no se incluye el MSD de este resultado.

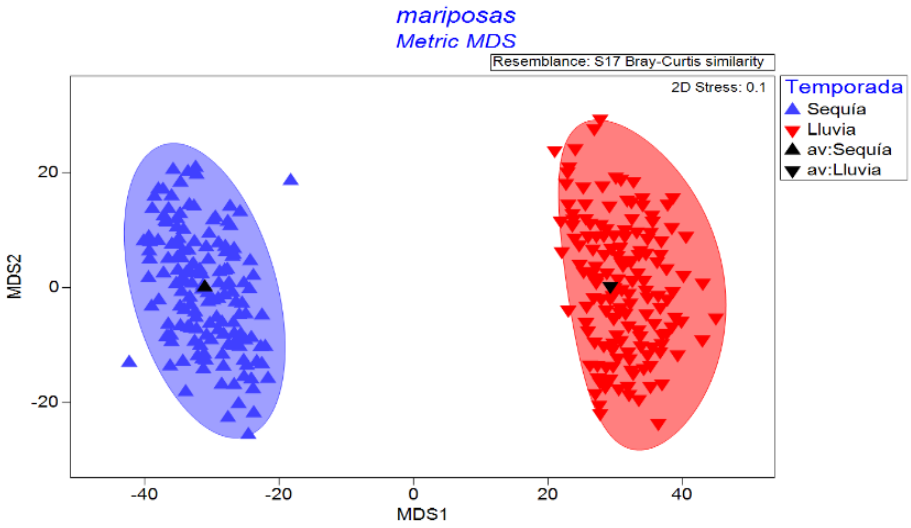


Figura 8. Ordenación de MDS usando el índice de Bray-Curtis calculado a partir de la abundancia de mariposas diurnas de las áreas cercanas, lejanas y el área con vegetación nativa en la época de sequía y lluvia.

El siguiente diagrama de Venn (Fig. 9) ilustra las especies compartidas y exclusivas para las dos distancias (cerca y lejos) a las cementeras y el área con vegetación nativa, incluye ambas temporadas del año. Se destaca en rojo las especies consideradas como indicadoras de disturbio, en verde las indicadoras de conservación y en rojo con verde las que indican tanto disturbio como conservación, conforme a la revisión de mariposas bioindicadoras en México realizada por Orta et al. (2022). En la inclusión de las dos temporadas, se registró 25 especies para Cem_A y For_A, 33 para Cem_B y For_B y 24 para Veg_nat.

Las distancias lejanas a las cementeras presentaron la mayor cantidad de especies exclusivas con un total de 18, seguidas de veg_nat con 12 y las áreas cercanas a las cementeras con solo cinco especies exclusivas. Las áreas cercanas y lejanas a las cementeras compartieron la mayor cantidad de especies, con 11 en común. En contraste, veg_nat compartió solo tres especies con las áreas lejanas y una con las áreas cercanas a las cementeras. Además, ocho especies fueron comunes entre todas las áreas estudiadas.

Cabe destacar que la mayoría de las especies compartidas entre las áreas cercanas y lejanas a las cementeras son inndicadoras de disturbio, como *Euptoieta hegesia meridiania*, *E. claudia daunius*, *Dione vanillae incarnata* lo que refleja su capacidad de adaptación a ambientes perturbados.

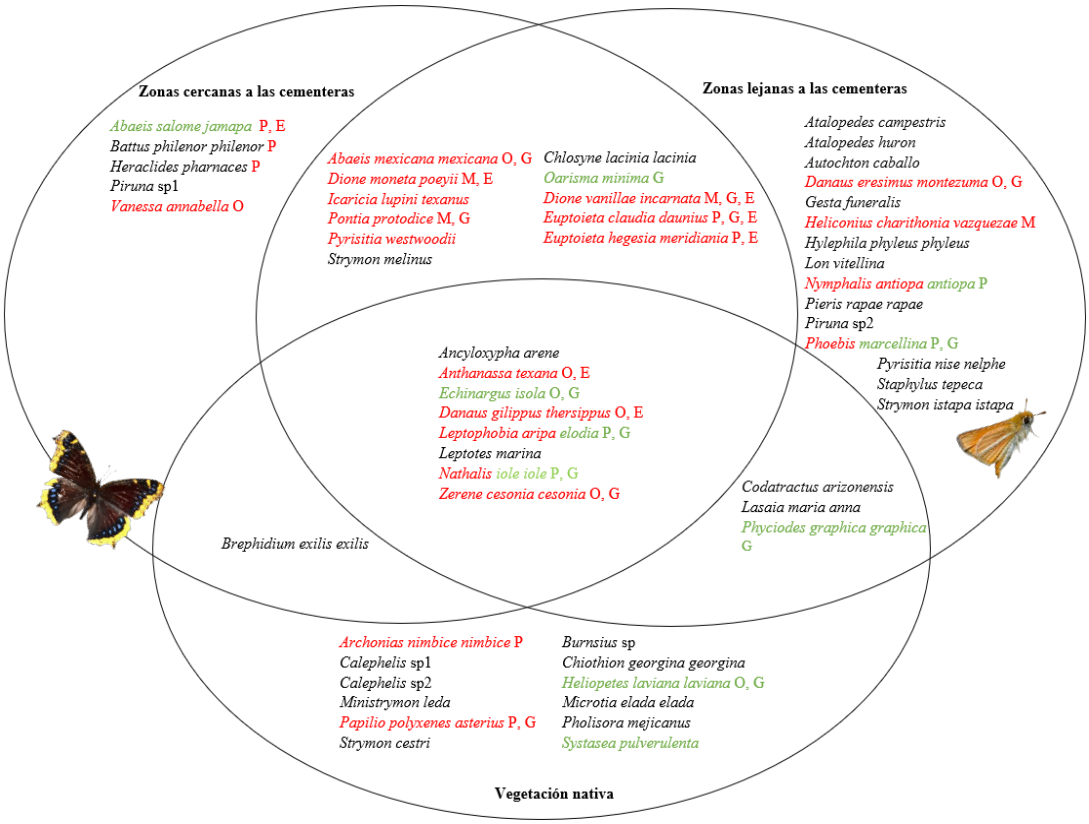


Figura 9. Diagrama de Venn de las especies de mariposas diurnas colectadas en las áreas cercanas y lejanas a las cementeras y el área con vegetación nativa. Las especies en rojo son consideradas como indicadoras de disturbio, en verde las indicadoras de conservación y en rojo con verde las que indican tanto disturbio como conservación. Se incluyen las letras P = Polífaga, O = Oligófaga, M = Monófaga de acuerdo a su fitofagia y E = Especialista, G = Generalista, por su grado de especialización.

7.3 Diversidad beta

El análisis de diversidad beta (βcc), según Baselga (2010), reveló un alto valor de disimilitud (69% en promedio) entre todas las distancias estudiadas y la vegetación nativa (veg_nat) en ambas épocas del año. El recambio de especies (β3) fue más destacado que el anidamiento (βrich), con valores de 51% y 18%, respectivamente (Fig. 10). En la Tabla 4 se presentan los valores de recambio y anidamiento para cada comparación entre las distancias a las cementeras y la veg_nat, tanto para las temporadas y en conjunto.

Tabla 4. Diversidad beta de todas las áreas de estudio con sus valores de recambio y anidamiento. Se incluye a las distancias lejanas y cercanas a las cementeras y el área con vegetación nativa (Veg_nat)

Pares	Disimilitud total	Recambio	Anidamiento
Ambas temporadas			
Distancias lejanas-distancias cercanas	0.53	0.29	0.24
Distancias cercanas-Veg_nat	0.76	0.71	0.05
Distancias lejanas-Veg_nat	0.79	0.54	0.25
Temporada seca			
Distancias lejanas-distancias cercanas	0.85	0.85	0
Distancias cercanas-Veg_nat	0.77	0.44	0.33
Distancias lejanas-Veg_nat	0.77	0.44	0.33
Temporada de lluvia			
Distancias lejanas-distancias cercanas	0.53	0.29	0.24
Distancias cercanas-Veg_nat	0.76	0.71	0.05
Distancias lejanas-Veg_nat	0.79	0.54	0.25

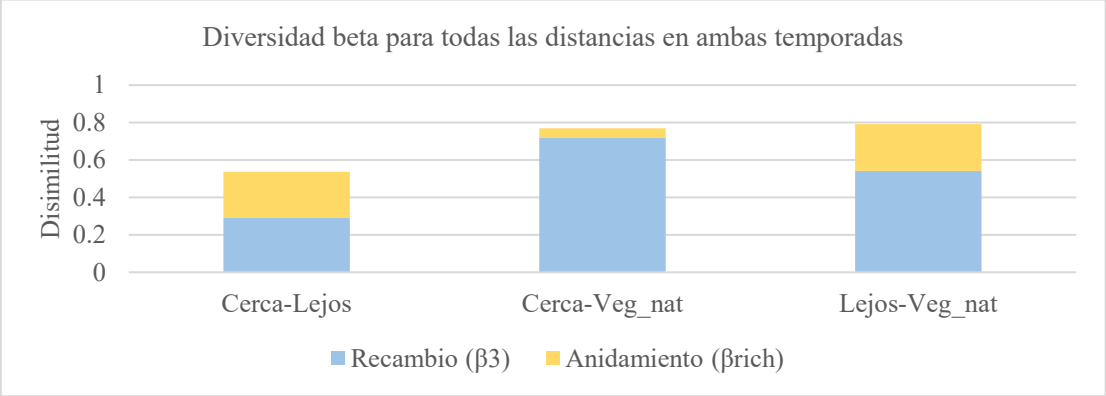


Figura 10. Comparación de la diversidad beta entre distancias cercanas y lejanas a las cementeras y el área con vegetación nativa (Veg_nat) en la integración de ambas temporadas.

Durante la temporada de sequía, la diversidad beta (βcc) entre las distancias y la vegetación nativa (veg_nat) presentó 80% de disimilitud, con el recambio de especies (β3) representando

el 57%, mientras que el anidamiento (βrich) contribuyó con el 21% (Fig. 11a). En la temporada de lluvia, la diversidad beta (βcc) mostró un 69% de disimilitud entre las distancias y veg_nat, con el recambio (β3) nuevamente más relevante que el anidamiento (βrich), registrando valores de 51% y 18%, respectivamente (Fig. 11b).

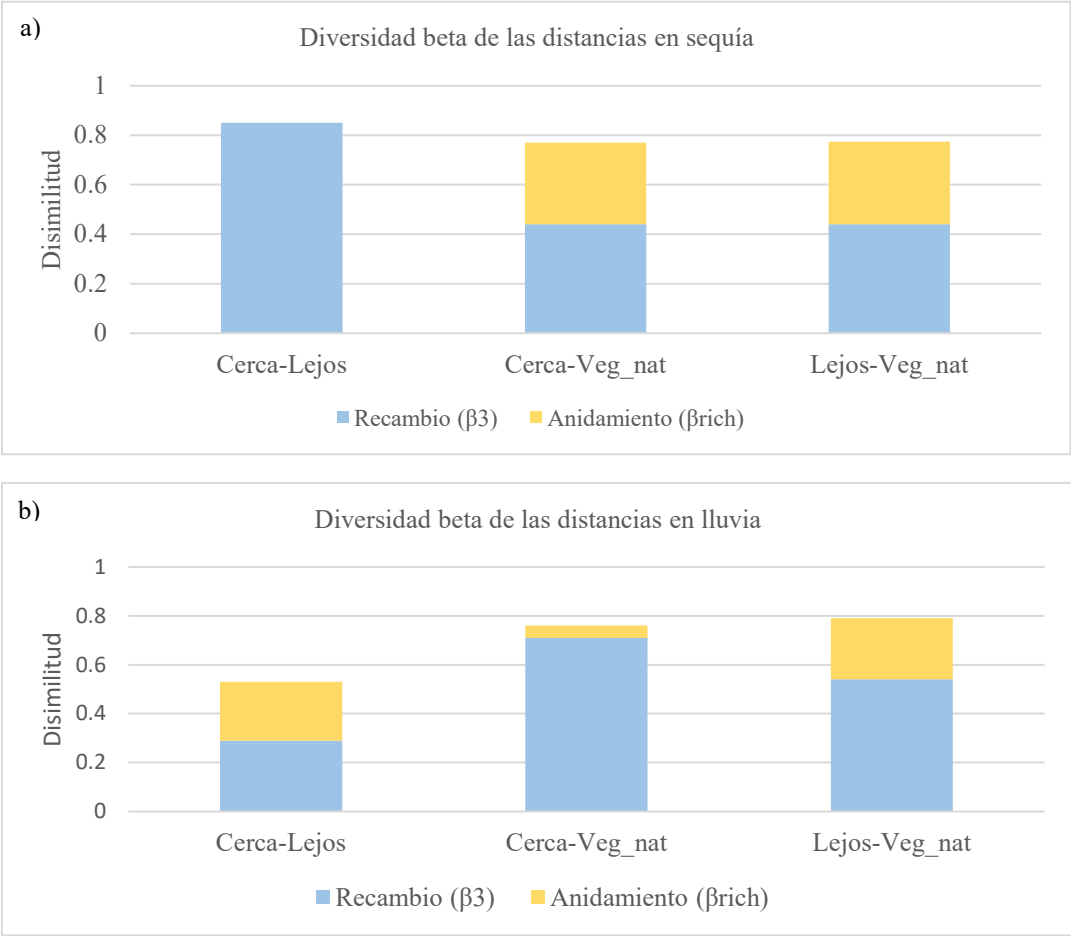


Figura 11. Comparación de la diversidad beta entre distancias cercanas y lejanas a las cementeras y el área con vegetación nativa (Veg_nat) en a) sequía y b) lluvia.

7.4 Lista taxonómica de especies complementaria obtenida de íNaturalistMX

De la fuente de datos consultada (íNaturalistMX), en Atotonilco de Tula hasta abril de 2024, la plataforma ha contribuido con un total de 167 observaciones de mariposas. No obstante, solo se consideran 142, debido a que las demás no proporcionaron la información necesaria para su inclusión en la lista de especies. Estas 142 observaciones se distribuyen en seis familias, incluye 43 géneros y 57 especies (Tabla 4).

El primer registro en íNaturalistMX data del 18 de octubre de 2014, mientras que el último se realizó el 21 de noviembre de 2023. La familia mejor representada fue Nymphalidae, con cinco subfamilias, 13 géneros y 22 especies. Le sigue Hesperiidae, con tres subfamilias, ocho géneros y 10 especies. La familia menos representada fue Riodinidae, con una subfamilia, un género y una especie.

Tabla 5. Composición taxonómica de las especies de mariposas diurnas obtenidas de la plataforma íNaturalistMX para Atotonilco de Tula; S: número de especies. El nombre de las especies se incluye de acuerdo a la actualización taxonómica de Warren *et al. (*2024).

Familia/Subfamilia/Especie	
Hesperiidae (S=10)	**Nymphalinae (S=11)**
Eudaminae (S=5)	**Anthanassa texana* (W. H. Edwards, 1863)
Phocides lilea (Reakirt, [1867])	*Chlosyne ehrenbergii* (Geyer, [1833])
Telegonus anausis annetta (Evans, 1952)	**Chlosyne lacinia lacinia* (Geyer, 1837)
Telegonus cellus (Boisduval & Le Conte, [1837])	*Chlosyne theona mullinsi* (Austin & M. Smith, 1998)
Thorybes dorantes dorantes (Stoll, 1790)	*Junonia coenia* (Hübner, [1822])
Urbanus proteus proteus (Linnaeus, 1758)	**Nymphalis antiopa antiopa*
Hesperiinae (S=1)	*Siproeta stelenes biplagiata* **(**Fruhstorfer, 1907)
* *Oarisma minima* (W. H. Edwards, 1870)	**Vanessa annabella*
Pyrginae (S=4)	*Vanessa atalanta rubria* (Fruhstorfer, 1909)
**Gesta funeralis*	*Vanessa cardui* (Linnaeus, 1758)
Erynnis tristis tatius (W. H. Edwards, 1883)	*Vanessa virginiensis* (Drury, 1773)
**Pholisora mejicanus*	**Papilionidae (S=7)**
Eantis pallida (R. Felder, 1869)	**Papilioninae (S=7)**
Lycaenidae (S=7)	**Battus philenor philenor* (Linnaeus, 1771)
Polymmatinae (S=4)	**Heraclides pharnaces* (E. Doubleday, 1846)
**Brephidium exilis exilis*	*Heraclides rumiko* (Shiraiwa & Grishin, 2014)
**Echinargus isola*	*Papilio polyxenes asterius* (Stoll, 1782)
**Icaricia lupini texanus* (Goodpasture, 1973)	*Pterourus garamas garamas* (Geyer, [1829])
**Leptotes marina*	*Pterourus multicaudata multicaudata* (W. F. Kirby, 1884)
Theclinae (S=3)	*Mimoides thymbraeus aconophos* (Boisduval, 1836)
Pendantus guzanta (Schaus, 1902)	**Pieridae (S=12)**
Callophrys xami xami (Reakirt, [1867])	**Coliadinae (S=9)**
**Strymon melinus*	**Abaeis mexicana mexicana*
Nymphalidae (S=22)	*Anteos clorinde* (Godart, [1824])
Biblidinae (S=1)	*Anteos maerula* (Fabricius, 1775)
Mestra amymone (Ménétriés, 1857)	*Colias eurytheme* (Boisduval, 1852)
Cyrestinae (S=1)	**Nathalis iole iole*
Marpesia chiron marius (Cramer, 1779)	*Phoebis agarithe agarithe* (Boisduval, 1836)

Danainae (S=8)	**Phoebis marcellina*
**Danaus gilippus thersippus*	*Phoebis philea philea* (Linnaeus, 1763)
Danaus plexippus plexippus (Linnaeus, 1758)	**Zerene cesonia cesonia*
Dione juno huascuma (Reakirt, 1866)	**Pierinae (S=3)**
**Dione moneta poeyii*	**Archonias nimbice nimbice* (Boisduval, 1836)
**Dione vanillae incarnata*	**Leptophobia aripa elodia*
**Euptoieta claudia daunius*	**Pontia protodice*
**Euptoieta hegesia meridiania*	**Riodinidae (S=1)**
**Heliconius charithonia vazquezae*	**Riodininae (S=1)**
Libytheinae (S=1)	*Calephelis* sp (Grote & Robinson, 1869)
Libytheana carinenta mexicana (Michener, 1943)	

En la figura 12, siguiendo el ejemplo anterior (Fig. 8) presenta un diagrama de Venn de especies compartidas y exclusivas entre las obtenidas de íNaturalistMX y las colectadas en campo en Atotonilco de Tula. De las 57 especies obtenidas de íNaturalistMX, 27 de ellas coinciden con las colectadas en campo, mientras que 30 no se colectaron.

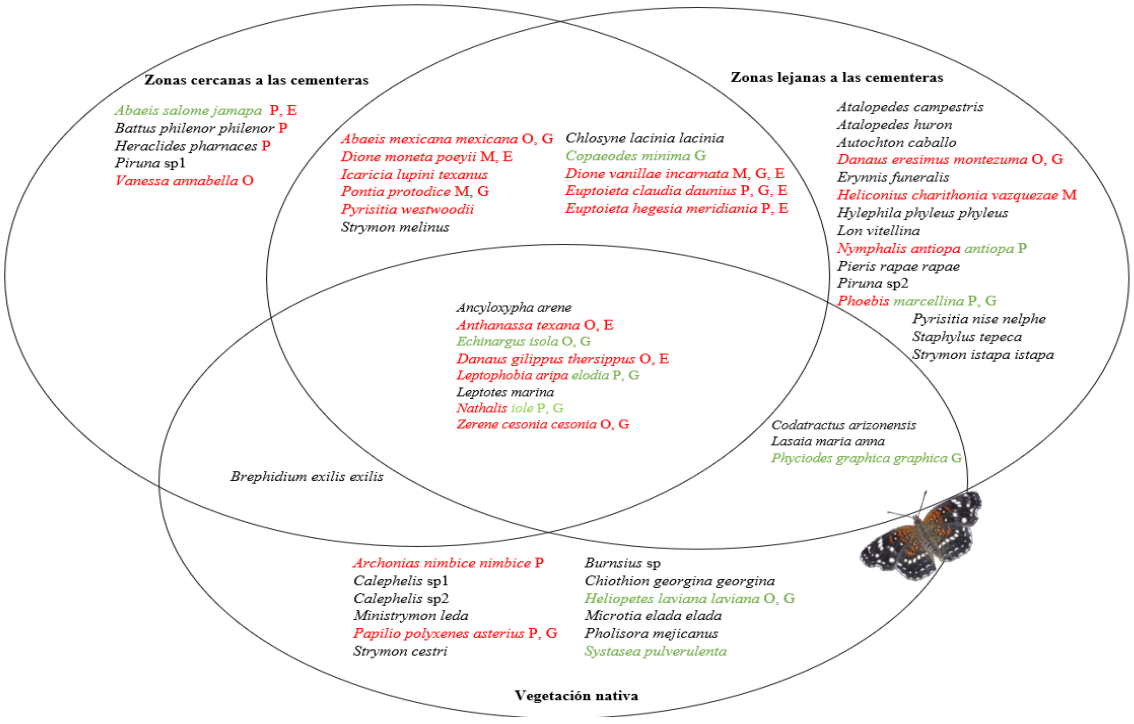


Figura 12. Diagrama de Venn de especies compartidas y exclusivas entre la información obtenida de íNaturalistMX y las colectadas en campo.

8. DISCUSIÓN

8.1 Diversidad alfa

8.1.1 Completitud del muestreo

De acuerdo al valor de la completitud del muestreo de 84%, es necesario incrementar el esfuerzo de muestreo durante ambas temporadas del año para aumentar el número de registros de especies. Para ello, se recomienda realizar un monitoreo mensual durante un año o más, ya que las mariposas son organismos móviles con una gran diversidad en sus interacciones, hábitats, microhábitats y nichos tróficos. Ampliar el esfuerzo de muestreo, considerando estos aspectos y utilizando diversos métodos de recolección adaptados a las características específicas de cada familia, podría mejorar las posibilidades de capturar aquellas especies no registradas en el campo (DeVries *et al.,* 2009).

Este enfoque no solo permitiría una estimación más precisa del número de especies adicionales, sino que también proporcionaría nueva información para comprender mejor la presencia de las mariposas en áreas con actividad minera no metálica.

8.1.2 Riqueza y abundancia de mariposas diurnas

De las 1672 especies de mariposas diurnas registradas para México (Llorente *et al.,* 2014), en este estudio se colectó 54, lo que representa el 3.22% del total. Asimismo, en comparación con las 431 especies reportadas para Hidalgo (García-Díaz *et al.,* 2021), las 54 especies constituyen el 12.54% de la biodiversidad estatal registrada.

La familia Hesperiidae fue la mejor representada entre las especies colectadas, en concordancia con lo reportado Warren (2000) y Vargas-Fernández (2016), quienes señalan que los hespéridos constituyen la familia con mayor riqueza de especies en México. Su predominancia se atribuye a su alta adaptación ecológica, lo que les permite aprovechar una amplia variedad de recursos alimenticios, explicando así su mayor presencia en comparación con otras familias.

Llorante et al. (2014), señala que, para México, Nymphalidae es la segunda familia con mayor diversidad después de Hesperiidae, lo que coincide con los resultados de este estudio. Andrade-C (1994), destaca que los ninfálidos poseen una alta adaptación ecológica, lo que les permite explorar una variedad de recursos alimenticios. En estado adulto, pueden alimentarse de néctar (gremio nectarívoro), minerales disueltos en arena húmeda, charcos (gremio hidrofílico), e incluso materiales orgánica en descomposición (gremio acimófago).

Esta versatilidad de los ninfálidos ayuda a comprender por qué fue la seunda familia con mayor número de especies colectadas.

La familia Pieridae, la tercera familia con mayor número de especies colectadas en este trabajo, es conocida por incluir especies colonizadoras favorecidas por la perturbación. Entre ellas destacan *Phoebis marcellina*, *Pyristia westwoodii*, *Nathalis iole iole* y *Leptophobia aripa elodia*, conocidas por su alta capacidad para explotar diversos recursos alimenticios y su amplia valencia ecológica (Hernández-Mejía, 2008a). Estas especies fueron frecuentes en varios sitios de colecta, lo que puede explicar su abundancia en ambientes abiertos. Además, alguas presentan características como ser multivoltinas, euriecas y heliófilas (Emmel y Austin, 1990; Fontenla, 1992), lo que favorece su adaptabilidad y éxito en diversos entornos.

La familia Lycaenidae, la cuarta familia con mayor número de especies encontradas en este estudio, incluye especies que suelen volar en el dosel de bosques ubicados en pendientes, en estratos altos y posadas en la copa de los árboles (Prieto y Dahners, 2006). Esta conducta dificulta su captura, lo que podría explicar su baja representatividad en este trabajo. Además, algunas áreas de muestreo, especialmente las cercanas a las cementeras, carecen de abundante vegetación, lo que limita la presencia de mariposas.

Las familias con menor diversidad fueron Riodinidae y Papilionidae, con solo tres especies cada una. Riodinidae es posiblemente la familia menos estudiada en términos de biología, ecología y sistemática. Sus adultos presentan una actividad limitada y pasan la mayor parte de su vida entre la vegetación. Además, su presencia está restringida temporal y espacialmente, ya que viven en microhábitats específicos en periodos concretos del día y del año, con un comportamiento predominantemente crepuscular (DeVries, 1997; Hall y Harvey, 2002b; Hall y Harvey 2002c). Asimismo, muchas especies de esta familia presentan una coloración opaca, tamaño reducido y un vuelo rápido y errático (Murillo-Hiller, 2008), lo que dificulta su captura, lo que pudo ocurrir en este estudio. Por otro lado, Papilionoidea, es una familia con pocas especies y poblaciones reducidas (Vargas-Fernández, 1998). También, sus especies suelen ser de gran tamaño que vuelan a gran altura, lo que complica su captura y podría explicar su baja representatividad en este estudio.

8.1.3 Comparación de la riqueza y abundancia de mariposas entre el área con vegetación nativa y áreas ubicadas a diferentes distancias de dos cementeras.

De acuerdo con la hipótesis propuesta, se esperaba que la mayor riqueza y abundancia de mariposas diurnas se registrara en el área de vegetación nativa, ubicada en Ajacuba, seguida de las áreas de muestreo alejadas de las cementeras y, finalmente, en las áreas cercanas a estas industrias. Sin embargo, los resultados de este estudio indican que no existen diferencias significativas en la riqueza de especies entre los sitios cercanos y lejanos a las cementeras, ni en comparación con el área de vegetación nativa.

Estos resultados podrían explicarse debido a que las áreas cercanas a las cementeras podrían contar con características favorables para las mariposas, como la presencia de plantas utilizadas para alimentarse o reproducirse, especialmente en el caso de especies tolerantes a los disturbios antrópicos y generalistas. Por otro lado, aunque se esperaba una mayor riqueza de especies en las áreas de vegetación nativa, esto podría estar limitado por factores como la utilización de solo una réplica de estudio, es decir, una única área de muestreo empleada para comparar contra cuatro áreas, así como por la presencia de áreas agrícolas circundantes. De acuerdo con Monasterio et al. (2015), una de las principales amenazas para las mariposas proviene de la agricultura, debido a la contaminación asociada al uso de pesticidas y otros productos químicos que afectan especialmente a las especies más sensibles a la perturbación ambiental.

También podría ser que el muestreo no consideró factores estacionales que influyen en la actividad de las mariposas, como la disponibilidad de flores o las variaciones en la temperatura, o que algunas especies hayan desarrollado adaptaciones a ambientes alterados por la actividad industrial. Además, la riqueza de mariposas no depende únicamente de la proximidad a las cementeras o la vegetación nativa, sino que tiene influencia por una serie de factores ecológicos complejos, como el clima, las interacciones biológicas entre especies, la disponibilidad de hábitats y la conectividad de los fragmentos de vegetación. Finalmente, el impacto de las cementeras podría haberse hecho más evidente a escalas mayores o a lo largo de un periodo más largo, lo que el estudio no pudo captar al limitarse a una muestra temporal o espacialmente reducida.

Quintana y López (2019) encontraron un resultado similar al no obtener diferencia en la riqueza de especies de aves en ambientes antrópicos en una localidad del centro de México al comparar áreas poco alteradas como matorral contra uno rural con perturbación.

Por otro lado, las diferencias observadas en el orden q^1, donde existió mayor diversidad ecológica en el área con vegetación nativa en comparación con las distancias cercanas a las cementeras, pueden explicarse por la heterogeneidad de hábitats y disponibilidad de recursos en el área con vegetación nativa, manteniendo microhábitats que benefician a las mariposas diurnas. En contraste, las áreas perturbadas cercanas a las cementeras podrían carecer de esta diversidad estructural, lo que genera una mayor competencia por los recursos limitados durante la sequía. Esto favorece a unas pocas especies dominantes (Por ejemplo, *Echinargus* isola y *Leptotes marina*), lo que reduce la equitatividad y, en consecuencia, el valor de la diversidad ecológica. La falta de recursos y estructura en las distancias cercanas a las cementeras impide que las comunidades de mariposas mantengan la misma diversidad que en las áreas de vegetación nativa.

Ombugadu et al. (2021) compararon la diversidad de mariposas en una institución en Nigeria entre hábitats perturbados y no perturbados, obteniendo resultados similares a los de este trabajo. Reportaron que los sitios no perturbados presentaron mayor diversidad ecológica, lo que puede atribuirse al bajo nivel de actividades antropogénicas, la menor pérdida de hábitat y la mínima perturbación en comparación con los sitios perturbados. En el área no perturbada, es probable que las mariposas dispongan de más recursos y microhábitats adecuados, mientras que, en las áreas perturbadas, la destrucción de vegetación y el agotamiento de recursos necesarios para su actividad diaria limitan la diversidad de especies.

8.1.4 Riqueza y abundancia de mariposas en temporada de lluvias y secas

En este estudio se registró una menor riqueza y abundancia de mariposas diurnas durante la temporada de sequía en comparación con la temporada de lluvias. Esta variación se explica por el marcado contraste en las condiciones ambientales entre ambos períodos en México.
Durante la temporada de lluvias, la mayor disponibilidad de agua favorece un crecimiento más rápido y abundante de las plantas, lo que incrementa la oferta de recursos alimenticios. Esto se traduce en una mayor disponibilidad de plantas hospederas y flores productoras de néctar, esenciales para la alimentación tanto de las orugas como de las mariposas adultas.

Además, las temperaturas moderadas y la mayor humedad en esta temporada crean condiciones óptimas para su desarrollo y supervivencia. En contraste, durante la temporada seca, el calor extremo y la escasez de agua generan un ambiente menos favorable para la reproducción y el desarrollo de las mariposas, lo que reduce significativamente su presencia (Trejo y Dirzo, 2002; Balvanera, 2011).

Otro factor clave que explica la mayor riqueza y abundancia de mariposas en la temporada de lluvias es la proliferación de microhábitats, como charcas temporales y áreas con vegetación más densa, que se forman debido a las lluvias. Estos microhábitats proporcionan a las mariposas refugio, lugares adecuados para la puesta de huevos y protección frente a depredadores. Además, muchas especies de mariposas sincronizan sus ciclos reproductivos con la temporada de lluvias, aprovechando las condiciones ideales para el desarrollo de sus larvas, que dependen de la vegetación disponible. Todo esto tiene repercusiones en las mariposas, insectos sensibles a los cambios en la cobertura vegetal y las condiciones microclimáticas (Thomas, 1991; Brown y Hutchings, 1997).

8.1.5 Curva Rango-Abundancia

De acuerdo con la curva de rango-abundancia, las especies que estuvieron presentes en todas las áreas de estudio durante ambas temporadas del año fueron *Echinargus isola*, *Leptotes marina* y *Nathalis iole iole*. *L. marina* (Fig. 13) es una especie multivoltina (produce más de dos generaciones al año) y se encuentra comúnmente en matorrales de mezquite, jardines urbanos, desierto, campos de alfalfa y agrícolas, áreas baldías y perturbadas, lo que le permite ocupar una gran variedad de hábitats. Esta amplia distribución explica su presencia y abundancia en todas las áreas de colecta en el presente estudio (Sada y Madero, 2011).

Figura 13. Ejemplar macho de *Leptotes marina* ♂. Imagen tomada de del catálogo en línea: Butterflies of America (http://butterfliesofamerica.com/)

Echinargus isola (Fig. 14), una especie nativa de México, oligófaga y generalista, suele habitar pastizales, campos, desiertos, prados, zonas con maleza, orillas de arroyos, lo que le permite ocupar una amplia variedad de hábitats, incluidos los del presente estudio. La abundante presencia de la planta *Jatropha dioica* Seseé en áreas cercanas a Fortaleza favorece su abundancia. Además, en las proximidades de Fortaleza, se encuentra también *Neltuma laevigata* (Humb. Bonpl. ex Willd.) (Mezquite blanco), un árbol de la familia Fabaceae, del cual se sabe que las larvas de *E. isola* se alimentan, contribuyendo así a la abundancia de esta especie en dicha área (Sada y Madero, 2011).

Figura 14. Ejemplar hembra de *Echinargus isola* ♀, imagen tomada de del catálogo en línea: Butterflies of America (http://butterfliesofamerica.com/)

La frecuencia de especies de la familia Lycaenidae durante la temporada de sequía en todos los sitios estudiados se debe en gran medida a la presencia de *Echinargus isola* y *Leptotes marina*. Aunque *E. isola* suele considerarse un indicador de áreas conservadas de acuerdo con Orta et al. (2022), se encontró en abundancia en las cercanías de Fortaleza, con un total de 14 individuos. Esta área, considerada perturbada debido a su proximidad a la cementera y a características como la vegetación cubierta de polvo de acuerdo a lo observado en el presente estudio, así como a la escasa presencia de vegetación, contrasta con el concepto de áreas conservadas.

No obstante, la abundancia de *E. isola* en este sitio puede explicarse por la presencia de algunas de sus plantas hospederas, como *Mimosa pigra* L. y los géneros *Dalea* Ulbr.y *Desmodium* Desv., 1813, que fueron abundantes cerca de la cementera (observación personal). Además, al igual que los individuos de *E. isola*, individuos de la especie *L. marina* se alimentan de *Jatropha dioica* Seseé (Fig. 15), una planta leñosa común en las áreas de estudio.

Figura 15. Interacción entre especies de mariposas diuras y *Jatropha dioica* donde a) *Echinargus isola* y *Jatropha dioica* y b) *Leptotes marina* y *Jatropha dioica* y c) abundancia de *Jatropha dioica* en la zona cercana a la cementera Fortaleza, Atotonilco de Tula. (© Foto: Fátima Cruz Márquez).

Nathalis iole iole (Fig. 16), tercera especie más abundante, al igual que las mariposas anteriores, esta especie abarca gran cantidad de hábitats, como áreas abiertas, campos con malezas, borces de caminos, prados, laderas y lomas, y suele alimentarse de Astaráceas, entre ellas, algunas especies de *Tagetes* L., 1753, *Cosmos* Cav. y *Dyssodia* L., como cempasúchil, parraleña y otras (Moyers-Arévalo, 2009). Algunas de estas plantas han sido reportadas para Atotonilco de Tula y Ajacuba de acuerdo a datos de íNaturalistMX (https://goo.su/xkd3UN1; https://goo.su/CwLUO).

Figura 16. Ejemplar macho de *Nathalis iole iole* ♂, imagen tomada de del catalogo en línea: Butterflies of America (http://butterfliesofamerica.com/)

Anthanassa texana (Fig. 17), una de las especies más abundantes registrada en las distancias más alejadas de las cementeras y en el área con vegetación nativa, según Hernández (2021), puede distribuirse en una variedad de hábitats, como matorrales xerófilos, zonas agrícolas, áreas abiertas, caminos y parques urbanos. Esta amplia distribución le permite desplazarse y habitar diferentes tipos de vegetación, lo que, sumado a su presencia durante todo el año, explica su abundancia en el presente estudio.

Figura 17. Ejemplar hembra de *Anthanassa texana* ♀, imagen tomada de del catálogo en línea: Butterflies of America (http://butterfliesofamerica.com/)

Por otro lado, la baja abundancia de mariposas durante la temporada de sequía dificultó su análisis en la curva de rango-abundancia. Sin embargo, con el aumento de individuos en la temporada de lluvia, fue posible identificar las especies más abundantes en las áreas de estudio.

Entre ellas, *Brephidium exilis exilis*, destacó por su alta presencia en el área de vegetación nativa durante la temporada de lluvia. Esta especie, considerada la mariposa más pequeña del mundo, es característica de hábitats áridos y alcalinos, como desiertos, marismas, terrenos baldíos y matorrales y sus adultos suelen emerger entre julio y septiembre. En el área de vegetación nativa, se identificaron plantas hospedantes como *Atriplex* L. 1753 (Fig. 18), lo que podría explicar su presencia en la zona. Rodríguez (2021), también reportó a *B. exilis exilis* como abundante en zonas xerófilas durante los periodos fríos.

Figura 18. *Atriplex suberecta* o Chamizo Australiano, especie introducida en México, con presencia en el área con vegetación nativa en Ajacuba. (© Foto: Fátima Cruz Márquez).

Hernández (2021) reporta *Anthanassa texana* y *Nathalis iole iole* como especies abundantes en su análisis de la biodiversidad de mariposas diurnas en la Reserva de la Biosfera Barranca de Metztitlán, en el estado de Hidalgo. De manera similar, Pérez-Jarillo (2017) señala la abundancia de *N. iole iole* y *Brephidium exilis exilis* en Pachuca de Soto, Hidalgo. Por lo tanto, se puede considerar que estas especies son comunes en el estado de Hidalgo.

8.2 Composición de especies y diversidad beta

8.2.1 Composición de especies

Con base en el análisis PERMANOVA, se observaron diferencias en la composición de especies de mariposas diurnas entre las temporadas. Sin embargo, no se identificaron diferencias significativas en la composición entre las áreas alejadas y cercanas a las cementeras, ni en el área con vegetación nativa durante ambas temporadas del año.

Los resultados sugieren que la composición de las especies en los sitios estudiados es similar, lo que podría deberse a la cercanía y conectividad entre las áreas. A pesar de las diferencias en el tipo, cantidad y calidad de vegetación, las comunidades de mariposas parecen ser similares, debido principalmente a la presencia de especies generalistas que se adaptan a una amplia variedad de ambientes. Este tipo de especies pueden encontrarse tanto en áreas con vegetación nativa como en áreas perturbadas, lo que da lugar a una composición

relativamente homogénea de especies entre las áreas evaluadas. Rodríguez (2021) y Fraija y Fajardo (2006) reportan una similitud comparable entre cinco localidades en los Llanos Orientales Colombianos, destacando que los sitios con mayor similitud se encuentran a poca distancia unos de otros.

Otra explicación del porque no se encontraron diferencias significativas en la composición de mariposas diurnas en el análisis general, puede deberse a las limitaciones del índice empleado, Bray-Curtis y otros factores ecológicos que contribuyen a la similitud de las comunidades en áreas perturbadas y con mayor cantidad de vegetación nativa. Aunque el índice de Bray-Curtis es útil para comparar la similitud entre comunidades, puede no ser sensible a algunas diferencias sutiles en la composición de especies, especialmente si la abundancia de las especies dominantes es similar entre las áreas comparadas, por ejemplo, por las especies *Echinargus isola*, *Leptotes marina*, etc. En este caso, la similitud en la abundancia de las especies clave en las áreas de estudio, podría haber reducido las diferencias detectadas.

Asimismo, si las mariposas colectadas no fue lo suficientemente grande o representativa durante el período de muestreo, las diferencias entre las áreas podrían no haber sido detectadas de manera significativa. Además, las variaciones en las comunidades de mariposas entre las temporadas pueden influir en los resultados. Por ejemplo, en la temporada de sequía se obtuvo una baja riqueza y abundancia de mariposas, lo que ocultó diferencias entre las áreas.

8.2.2 Diversidad beta: anidamiento y recambio durante ambas temporadas

De acuerdo con el método Baselga (2010) con base en datos de presencia-ausencia, el valor de disimilitud entre las distancias a las cementeras y el área con vegetación nativa fue alto, con un promedio del 69%. Este valor se mantuvo consistente al analizar conjuntamente ambas temporadas del año, y se atribuyó al recambio de especies, fenómeno que también se observó al analizar las temporadas por separado.

Los resultados sugieren que la variación en las especies presentes en las diferentes distancias a las cementeras y el área con vegetación nativa podría estar relacioada con factores como las condiciones ambientales, la disponibilidad de recursos y la calidad del hábitat, ya que cada especie tiene requisitos específicos para su supervivencia.

La diferencia entre las áreas cercanas y lejanas a las cementeras, observada a través del recambio en el análisis conjunto de ambas temporadas, revela variaciones en las especies que habitan en cada zona. Aunque los valores de recambio y anidamiento no mostraron diferencias significativas, se evidenció una sustitución de especies, así como variaciones en la riqueza, que afectan de manera similar la composición de las mariposas diurnas en ambas áreas.

Asimismo, para cada área, se identificaron especies exclusivas. Entre las once especies compartidas entre las áreas cercanas y lejanas a las cementeras, en la integración de ambas temporadas, se encuentran ocho consideradas indicadoras de disturbio, adaptadas a hábitats alterados, así como ser resistentes a variaciones en las condiciones ambientales que especies más especialistas. De estas, dos son polífagas: *Euptoieta claudia daunius* y *E. hegesia meridiania*; una es oligófaga: *Abaeis mexicana mexina*; y tres son monófagas: *Dione moneta poeyii*, *Pontia protodice* y *D. vanillae incarnata*. De las dos especies restantes, *Icaricia lupini texanus* y *Pyrisitia westwoodii*, se desconoce su fitofagia (Orta *et al.,* 2021).

Especies como *Euptoieta claudia daunius* y *E. hegesia meridiania* suelen habitar áreas abiertas y soleadas, tales como praderas, campos, pastizales, bordes de caminos y zonas con maleza. Se alimentan del néctar de flores de plantas como *Lantana* L. y *Passiflora incarnata* L., 1753, entre otras de diversas familias, lo que les permite adaptarse tanto a áreas cercanas como lejanas a las cementeras, ya que son indicadoras de disturbios. Por su parte, *Abaeis mexicana mexicana* es una especie generalista que se encuentra en una amplia variedad de hábitats, como áreas abiertas, praderas, matorrales y bosques de pino y encino. *Dione moneta poeyii* y *D. vanillae incarnata* prefieren áreas con bordes, claros y pastizales, siendo comunes en zonas urbanas. La primera se alimenta de *Passiflora*, mientras que la segunda consume diversas especies de pasionarias. *Pontia protodice*, también una especie generalista, habita en áreas secas con maleza. Sus larvas son oligófagas y se alimentan de plantas de la familia Brassicaceae, que incluye géneros ruderales y arvenses, lo que explica su presencia en áreas perturbadas.

A diferencia del resultado anterior, la disimilitud entre las áreas cercanas a las cementeras y el área con vegetación nativa, al integrar ambas temporadas, fue mayormente atribuida al

recambio de especies. Este patrón se debe a la presencia de una única especie compartida: *Brephidium exilis exilis*.

Según Pittaway et al. (2006), *B. exilis exilis* es común en entornos perturbados, como en las áreas cercanas a la cementera Fortaleza. Sin embargo, Otto (2014) señala que su alta abundancia también podría estar relacionada con su amplia distribución en áreas áridas. En este caso, es probable que ambas variables, la perturbación ambiental y las condiciones áridas, influyan en su presencia en la zona de muestreo, ubicada junto al canal de aguas residuales del Valle de México (Fig. 19). Aunado a lo anterior, los agricultores de la región utilizan esta agua para el riego de cultivos (García-Salazar, 2020), sumado a la contaminación propia de las actividades agrícolas, lo que genera un efecto de perturbación en el ecosistema, favoreciendo a especies tolerantes como *B. exilis exilis*.

Figura 19. Canal de aguas residuales provenientes del Valle de México en el área de muestreo con vegetación nativa, Ajacuba. Hidalgo. (© Foto: Fátima Cruz Márquez).

El recambio observado entre las áreas cercanas a las cementeras y el área con vegetación nativa coincide con lo reportado por Ramírez-Ponce et al. (2019), quienes encontraron valores altos de disimilitud al comparar la composición de escarabajos estercoleros en condiciones perturbadas y conservadas. Al igual que en este estudio, ellos observaron una alta diversidad beta, atribuida al recambio de especies, lo que sugiere que la composición de especies entre estas comunidades cambia drásticamente debido a las condiciones de perturbación.

Un estudio similar realizado por Guerrero y Ordóñez (2013) también encontró un alto recambio de mariposas diurnas entre áreas conservadas y perturbadas, con una baja coincidencia en el número de especies compartidas.

Por otro lado, Quintana y López (2019) también reportaron diferencias significativas entre las especies presentes en ambientes de matorral, ribereño, rural y urbano, encontrando una mayor similitud entre los tres primeros, mientras que el ambiente urbano presentó una composición de especies notablemente distinta. Este patrón coincide con las diferencias observadas entre las áreas cercanas a las cementeras, más urbanizadas, y el área con vegetación nativa, que mantiene una composición de especies diferente.

Asimismo, las mariposas tienen una relación estrecha con las plantas, y su presencia está fuertemente influenciada por la flora, la estructura de la vegetación y la calidad del hábitat. En las áreas cercanas a las cementeras, como la cercana a la cementera Fortaleza, se observó que el suelo está degradado y cubierto por una capa compacta (Fig. 20), lo que podría estar limitando el desarrollo de especies vegetales, además de las ya presentes, lo que limita la presencia de mariposas.

Como señalan Rincón et al. (2023), la industria cementera, a través de sus diversos procesos operativos, genera residuos que deterioran el ambiente, como la emisión de polvo, la deforestación, la remoción del suelo y la alteración de la capa superficial del mismo, lo que reduce la disponibilidad de suelo fértil.

Figura 20. Vista del suelo en la zona de colecta cercana a la cementera Fortaleza, Atotonilco de Tula. (© Foto: Fátima Cruz Márquez).

Estas condiciones negativas para las mariposas favorecen la presencia de especies más tolerantes a la contaminación, mientras que las especies más sensibles se encuntran en las áreas más alejadas de las cementeras, lo que explica el recambio observado en este estudio.

Un ejemplo que ilustra este fenómeno es el estudio de Mutlu y Ökkeş (2019), quienes analizaron el impacto del polvo de cemento en la diversidad de plantas cercanas a fábricas de cemento. Identificaron 36 especies a 2000 metros de la planta, de las cuales 24 resultaron ser sensibles a la contaminación por polvo de cemento, lo que les impide crecer adecuadamente en ese suelo. Las alteraciones en las condiciones de las plantas tienen un impacto significativo en las mariposas, especialmente en las especies residentes, ya que modifican la disponibilidad de plantas tanto para las larvas como para los adultos (Moore, 1975).

Asimismo, en el área cercana a Cemex, durante una salida de campo, se observó (observación personal) un charco con agua de color rojizo (Fig. 21), lo cual podría estar asociado con la presencia de metales pesados como níquel y zinc (Vera, 2013). Estos factores podrían estar contribuyendo a la presencia de especies tolerantes a la contaminación en las áreas cercanas a las cementeras, lo que explicaría el recambio observado entre las áreas, especialmente en comparación con el área de vegetación nativa. En esta última, se encuentran especies cuya biología es poco conocida y que se presentan en cantidades limitadas.

Figura 21. Charco de agua con aspecto rojizo cerca de la cementera Cemex, Atotonilco de Tula. (© Foto: Fátima Cruz Márquez).

Por otra parte, la diferencia observada en la integración de ambas temporadas entre las áreas alejadas de las cementeras y la zona con vegetación nativa también se debe al recambio de especies. Sin embargo, el anidamiento fue relativamente mayor en comparación con las áreas cercanas a las cementeras. Esto indica que, aunque existen especies exclusivas para cada área, también se observa similitud en el número y tipo de especies presentes en las áreas alejadas de las cementeras y en la zona con vegetación nativa.

En las áreas alejadas de las cementeras se encontraron especies como *Codatractus arizonensis*, *Lasaia maria anna* y *Phyciodes graphica graphica*, de las cuales se dispone de poca información. *C. arizonensis* se encuentra generalmente en cuerpos de agua y arroyos, mientras que *L. maria anna* habita en cañones con selva tropical seca y matorral espinoso. Por su parte, *P. graphica graphica* vive en bosques de espinos, mezquites, desiertos, praderas y cauces de arroyos secos, y vuela durante todo el año en México (Sada y Madero, 2011).

Las condiciones específicas de las áreas alejadas de las cementeras y el área con vegetación nativa parecen ser favorables para la presencia de estas especies, ya que no fueron halladas en las zonas cercanas a las cementeras. Además, se puede corroborar su ausencia en Atotonilco de Tula, según la lista obtenida de mariposas diurnas registradas en esa localidad a través de iNaturalistMX.

8.2.2.1 Diversidad beta: anidamiento y recambio en temporada de sequía

La disimilitud total entre las áreas cercanas y lejanas a las cementeras durante la temporada de sequía se debió completamente al recambio de especies. En las áreas cercanas a las cementeras se registraron las especies *Dione vanillae incarnata*, *Echinargus isola*, *Leptotes marina* y *Pontia protodice*, mientras que en las zonas alejadas se encontraron cinco especies: *Anthanassa texana*, *E. isola*, *L. marina*, *Nathalis iole iole* y *Staphylus tepeca*, coincidiendo solo en dos especies: *E. isola* y *L. marina*, que fueron de las más comunes en este estudio.

Las comunidades de mariposas en estas áreas muestran diferencias en su composición, adaptándose a las condiciones ambientales específicas de cada una. Durante la temporada de sequía, algunas especies persisten, mientras que otras son reemplazadas por aquellas mejor adaptadas a estas condiciones. Muchas especies univoltinas desaparecen temporalmente, esperando la temporada de lluvias para completar su ciclo de vida (Sada y Madero, 2011).

En cuanto a la disimilitud entre las áreas cercanas a las cementeras y el área con vegetación nativa, esta también se debió al recambio de especies. De las cuatro especies presentes en las áreas cercanas a las cementeras *Dione vanillae incarnata*, *Echinargus isola*, *Leptotes marina* y *Pontia protodice*, dos fueron exclusivas de estas áreas. Por otro lado, las especies exclusivas del área con vegetación nativa fueron *Anthanassa texana*, *Brephidium exilis exilis*, *Lasaia maria anna* y *Ministrymon leda*. *L. maria anna* ha sido reportada en hábitats como cañones con selva tropical seca y matorral espinoso, mientras que *M. leda* habita en áreas de matorral y bosque mixto, con árboles de mezquite (*Prosopis*, L., 1767, familia Fabaceae) como planta huésped de su larva. La presencia de estas especies en las áreas con vegetación nativa se explica por las características específicas de su hábitat natural (Sada y Madero, 2011).

Durante la temporada de sequía, en una visita al área de muestreo cercana a la cementera Cemex, se observaron árboles de *Buddleja cordata* Kunth, 1818, (Fig. 22), comúnmente conocido como Tepozán blanco. Algunas de sus hojas presentaban una capa grisácea de consistencia firme y compacta, similar al cemento, lo que podría ser resultado de los desechos generados y emitidos por la cementera en el área de estudio.

Figura 22. Hojas de *Buddleja cordata* o Tepozán blanco cubiertas por una capa grisácea similar al cemento, cerca de la cementera de Cemex, Atotonilco de Tula. (© Foto: Fátima Cruz Márquez).

El Tepozán blanco es especialmente atractivo para diversas especies de mariposas debido a sus flores fragantes y ricas en néctar. Las especies *Anthanassa texana* (Fig. 23a) y *Danaus gilippus thersippus* (Fig. 23b) se alimentan con frecuencia de este árbol, y ambas fueron registradas en las cercanías de las cementeras.

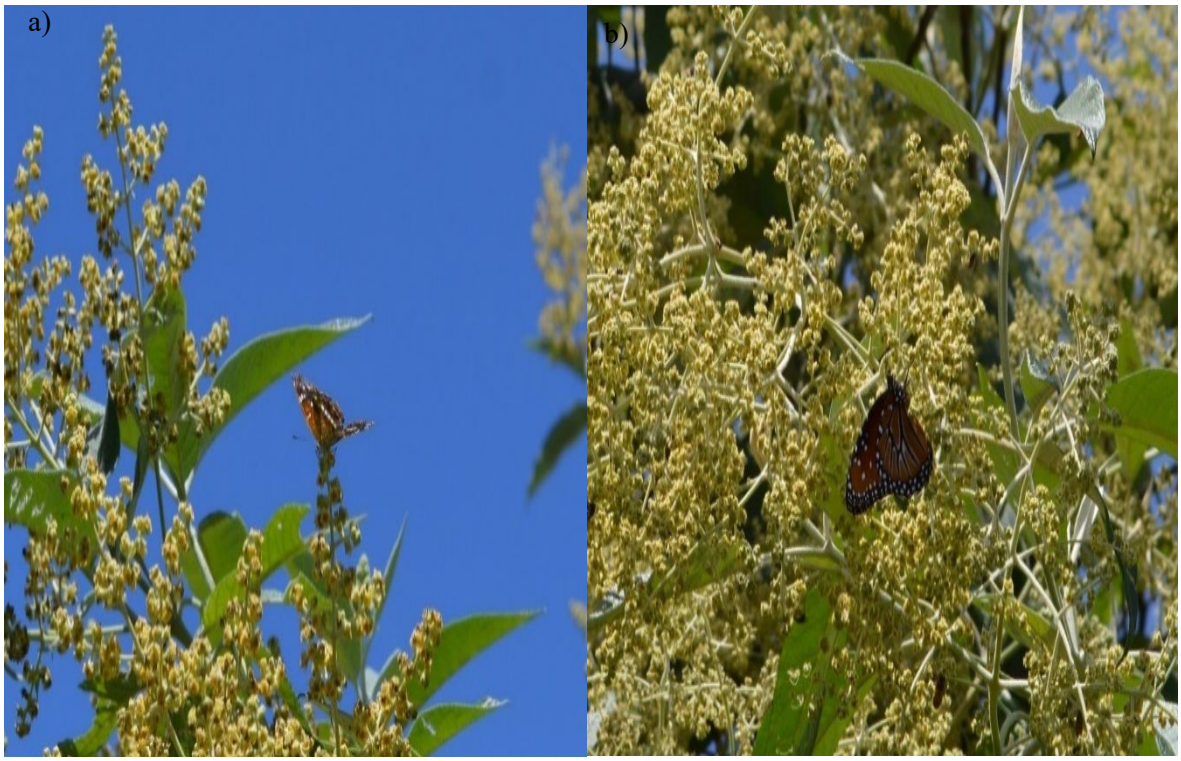


Figura 23. Evidencia externa al estudio de especies de mariposas diurnas en estado adulto alimentándose del tepozán blanco: a) *Anthanassa texana*, b) *Danaus gilippus thersippus*. (© Fotos: Fátima Cruz Márquez).

Las especies de mariposas diurnas que interactúan con árboles como el Tepozán blanco en zonas contaminadas, como las áreas cercanas a las cementeras, podrían verse negativamente afectadas debido a las malas condiciones que podría presentar la vegetación, como la presencia de polvo de cemento. Este fenómeno es similar al estudio de Osborne y Longcore (2021), que demuestra que la mortalidad de las larvas de *Gloveria medusa* aumenta cuando consumen plantas cubiertas con yeso. Tanto el yeso como el cemento provienen de minerales, lo que sugiere que los efectos de la contaminación por polvo de cemento pueden ser comparables a los efectos del yeso en las plantas y en las especies que dependen de ellas.

En la comparación de la diversidad beta durante entre las distancias lejanas a las cementeras y el área con vegetación nativa, nuevamente, la disimilitud se atribuye principalmente al recambio de especies. *Brephidium exilis exilis*, *Lasaia maria anna* y *Ministrymon leda* fueron exclusivas del área con vegetación nativa, mientras que, en las áreas lejanas a las cementeras, las especies exclusivas fueron *Staphylus tepeca* y *Nathalis iole iole*. Las únicas especies que

coincidieron entre ambas zonas fueron *Anthanassa texana*, *Echinargus isola* y *Leptotes marina.*

8.2.2.2 Diversidad beta: anidamiento y recambio en temporada de lluvia

Durante la temporada de lluvia, al igual que en las comparaciones anteriores, la disimilitud total entre todas las zonas se atribuyó al recambio de especies. En la comparación entre las distancias cercanas y lejanas a las cementeras, aunque el recambio fue predominante, los valores de anidamiento fueron similares.

Entre las especies exclusivas de las zonas cercanas a las cementeras se encuentran *Battus philenor philenor*, *Abaeis salome jamapa*, *Vanessa annabella* y *Heraclides pharnaces*. *Battus philenor philenor* es una especie común en jardines, parques y áreas urbanas, con una distribución amplia, presente casi todo el año, excepto en temporadas muy frías. Es polífaga, al igual que *Abaeis salome jamapa* y *Heraclides pharnaces*, que también son comunes en áreas urbanas y suelen encontrarse en bordes de bosque, especialmente en sitios perturbados (Sada y Madero, 2011; Orta *et al.,* 2022)

Por su parte, *Vanessa annabella* habita en lugares abiertos, como áreas con maleza, jardines, bordes de caminos, campos, colinas y chaparrales, además de zonas alteradas. Esta especie es oligófaga, lo que significa que se alimenta de un grupo limitado de plantas, generalmente dentro de la misma familia botánica (Sada y Madero, 2011; Orta *et al.,* 2022).

La presencia de especies polífagas en las zonas cercanas a las cementeras sugiere que estas tienen una mayor capacidad para adaptarse a los cambios en el entorno y a la disponibilidad de recursos, una característica crucial en áreas donde la vegetación nativa ha sido degradada y reemplazada por vegetación introducida. En estos sitios alterados por actividades humanas, como la minería, las especies polífagas tienden a prosperar, mientras que las especies oligófagas y monófagas podrían estar en declive.

Entre las especies exclusivas de las zonas lejanas a las cementeras se encuentra *Atalopedes huron,* que prefiere áreas rurales, aunque también se encuentra en parques y jardines. Es común observar a los adultos de esta especie alimentándose de néctar de lantanas y habitando en campos abiertos, llanuras, pastizales y áreas perturbadas, como las áreas alejadas de las cementeras (Sada y Madero, 2011).

Otra especie exclusiva de estas áreas es *Autochton caballo*, que se encuentra cerca de cuerpos de agua en montañas áridas, cañones y arroyos. *Danaus eresimus montezuma* habita en pastizales abiertos, campos y bordes de bosques tropicales estacionalmente secos. Por su parte, *Gesta funeralis* se encuentra en zonas áridas, tierras bajas cálidas o áridas y bordes de caminos (Sada y Madero, 2011).

Hylephila phyleus phyleus prefiere áreas abiertas y soleadas, como campos, céspedes, jardines, diques y bordes de caminos, mientras que *Nymphalis antiopa antiopa*, una especie migratoria, puede encontrarse en cualquier lugar con plantas hospederas como *Salix nigra* Marshall, *Salix babylonica* L., 1753, *Salix serícea* Marshall, *Ulmus americana* L. y *Populus deltoides* W.Bartram ex Marshall, 1785, entre otras especies, así como áreas con bosques, claros, parques, suburbios y áreas ribereñas. *Pyristia nise nelphe* habita en bosques con matorrales (Sada y Madero, 2011).

Finalmente, *Strymon istapa istapa*, otra especie exclusiva de las zonas alejadas a las cementeras, se encuentra en matorrales secundarios, pastizales con malezas, bordes de caminos y áreas abiertas y perturbadas, como las zonas lejanas a las cementeras (Sada y Madero, 2011). Las condiciones de las áreas lejanas a las cementeras, como su fragmentación, la presencia de zonas abiertas y pequeños cuerpos de agua, resultan ser ideales para la presencia de estas especies.

La diversidad beta entre las áreas cercanas a las cementeras y el área con vegetación nativa estuvo principalmente influenciada por el recambio de especies. En las áreas cercanas a las cementeras, se identificaron especies exclusivas como *Abaeis mexicana mexicana*, *Chlosyne lacinia lacinia*, *Oarisma minima*, *Piruna* sp1, *Pyrisitia westwoodii*, *Icaricia lupini texanus* y *Strymon melinus*. En contraste, especies exclusivas del área con vegetación nativa incluyeron *Archonias nimbice nimbice*, *Burnsius* sp, *Calephelis* sp1, *Calephelis* sp2, *Chiothion georgina georgina*, *Codatractus arizonensis*, *Heliopetes laviana laviana*, *Ministrymon leda*, *Papilio polyxenes asterius*, *Pholisora mejicanus*, *Phyciodes graphica graphica*, *Strymon cestri*, *Systasea pulverulenta* y *Microtia elada elada* (Sada y Madero, 2011).

Algunas de las especies encontradas en el área con vegetación nativa carecen de información detallada, principalmente porque pertenecen a la familia Hesperiidae, como *Systasea*

pulverulenta y *Burnsius* sp. A pesar de ser una familia altamente diversa (Warren, 2000), ha recibido poca atención en estudios.

También se colectaron individuos del género *Calephelis* y un solo individuo de las siguientes especies: *Microtia elada elada*, *Pholisora mejicanus* y *Strymon cestri* sobre los cuales se dispone de escasa información biológica. Las especies menos abundantes y más sensibles a la perturbación se encuentran en áreas de vegetación nativa, como el área de Ajacuba, donde se registraron especies con un solo individuo. Estas especies son más vulnerables a la presión humana debido a su baja abundancia, lo que indica la existencia de condiciones ecológicas especiales. La presencia de este tipo de especies sugiere una mayor fragilidad del ecosistema, ya que los hábitats más comunes albergan mayormente especies generalistas las cuales son esenciales para la diversidad del sitio (Cleary y Genner, 2006).

Por último, la disimilitud en la diversidad beta entre las distancias lejanas a las cementeras y el área con vegetación nativa durante la temporada de lluvia estuvo principalmente determinada por el recambio de especies. En las áreas alejadas de las cementeras se registraron especies como *Atalopedes huron*, *Autochton caballo* y *Pieris rapae rapae*, mientras que, en el área con vegetación nativa, la especie exclusiva fue *Brephidium exilis exilis.* La predominancia del recambio en este análisis se explica por las diferencias en las condiciones ambientales entre ambas áreas, como la calidad del suelo, la disponibilidad de agua, la exposición a la contaminación y la mayor cobertura vegetal en el área con vegetación nativa.

Entre las especies colectadas, varias presentan comportamientos migratorios. Por ejemplo, algunos adultos de la especie *Nymphalis antiopa antiopa*, colectada en la distancia lejana a Fortaleza, migran hacia el sur en otoño. Aunque en México no se ha documentado ampliamente su migración de larga distancia, como la de la mariposa monarca, se sabe que esta especie se distribuye por toda América del Norte, llegando hasta el centro de México, donde realiza movimientos estacionales. Estas mariposas suelen desplazarse entre diferentes altitudes en busca de mejores condiciones para reproducirse o hibernar, lo que sugiere una migración altitudinal en zonas montañosas, un comportamiento típico en especies de climas templados que les permite maximizar sus posibilidades de supervivencia (Luis-Martínez *et al.,* 2022).

Danaus gilippus thersippus, colectada en la distancia lejana a Fortaleza, Cemex, en la distancia cercana a Fortaleza y en el área con vegetación nativa, también realiza migraciones, aunque de menor distancia en comparación con la mariposa monarca. Sin embargo, sigue un patrón migratorio en regiones tropicales y subtropicales, incluyendo México. Sus movimientos pueden ser locales, pero algunos individuos migran hacia el sur en otoño. De manera similar, *Zerene cesonia cesonia* es conocida por realizar migraciones estacionales hacia el sur en otoño, desplazándose desde Estados Unidos hacia México (Galindo, 2021; Pozo *et al.,* 2008).

Otras especies migratorias observadas incluyen *Phoebis marcellina*, registrada en la distancia lejana a Cemex, *Euptoieta claudia daunius y E. hegesia meridiana* en las distancias cercanas a las dos cementeras y la distancia lejana a Cemex.

8.3.1 Especies indicadoras de disturbio y conservación compartidas entre áreas

Siguiendo la clasificación del estado de indicadoras de las especies de mariposas diurnas en el trabajo de Orta et al. (2022), las especies colectadas se clasificaron en categorías de indicadoras de disturbio y conservación. De las ocho especies comunes entre las tres zonas de estudio, tres fueron identificadas como indicadoras de disturbio: *Anthanassa texana*, *Danaus gilippus thersippus* y *Zerene cesonia cesonia*, especies tolerantes a la contaminación que se encuentran en una amplia variedad de hábitats, lo que explica su presencia en todas las áreas estudiadas.

En los alrededores del área con vegetación nativa existen zonas agrícolas, por lo que la presencia y captura de estas especies podría haberse visto influenciada por su desplazamiento entre estos hábitats. Como observación personal, *Zerene cesonia cesonia* mostró interacción con *Tithonia tubaeformis* (Jacq.) Cass. (Fig. 24 a y b), una especie nativa de México, conocida como ‘‘Gigantón’’, común en áreas agrícolas que atrae a esta especie debido a su relación con el entorno agrícola.

Figura 24. a) y b) *Zerene cesonia cesonia* alimentándose de *Tithonia tubaeformis*. (© Fotos: Fátima Cruz Márquez Maryana Rodríguez)

Un caso similar podría haber ocurrido con la especie *Leptophobia aripa elodia*, también compartida entre las áreas de colecta, la cual se clasifica como indicadora de disturbio y conservación. Esta especie se alimenta de miembros de la familia Brassicaceae (Cuevas-Salgado *et al.,* 2015) y se considera plaga en zonas agrícolas. También se observó interactuando con *Tithonia tubaeformis* (Fig. 25a). *Archonias nimbice nimbice*, también fue capturada exclusivamente en el área con vegetación nativa (Fig. 25b), donde las condiciones del entorno también podrían haber favorecido su presencia.

Figura 25. a) *Leptophobia aripa elodia* (© Foto: Iván Reséndiz Cruz) y b) *Archonias nimbice nimbice* (© Foto: susana_debenedetti), alimentándose de *Tithonia tubaeformis*.

La presencia de *Nathalis iole iole*, compartida entre las áreasde estudio, podría explicarse por su preferencia por zonas abiertas (Orta *et al.,* 2022) y por su carácter eurioico, es decir, su capacidad para tolerar variaciones en el ambiente (Hernández-Mejía *et al.,* 2008a).

En cuanto a las 11 especies compartidas entre las áreas cercanas y lejanas a las cementeras, la mayoría (ocho) son indicadoras de disturbio lo que refleja las condiciones perturbadas de Atotonilco de Tula, afectadas por la presencia de más de dos cementeras, así como otras actividades antropogénicas de alto impacto ambiental, como las caleras.

Sin duda, estas especies han actuado y siguen actuando como bioindicadoras del estado de salud ambiental de los sitios con cementeras, sugiriendo que las perturbaciones derivadas de la actividad minera están influyendo en la composición de la comunidad de mariposas y por lo tato en la biodiversidad local.

8.4 Uso de íNaturalistMX como recurso complementario en inventarios de mariposas diurnas

El uso de bases de datos derivadas de registros de ciencia ciudadana en investigaciones científicas ha sido objeto de debate debido a la presencia de sesgos geográficos, identificaciones realizadas por usuarios no expertos, errores en las fechas, entre otros factores (Hochmair, 2020). Sin embargo, en municipios como Atotonilco de Tula, donde la presión ambiental, especialmente por la industria del cemento, es significativa, esta información puede ser de gran utilidad. Puede contribuir a determinar la distribución de especies, su ausencia, evaluar el estado de conservación del entorno mediante la identificación de especies indicadoras de calidad ambiental, así como analizar las interacciones con plantas e incluso descubrir nuevas especies (Castro-Bastidas y Serrano-Serrano, 2022). Todo esto, claro, siempre y cuando se cumplan ciertas condiciones, como identificaciones realizadas por expertos, coordenadas geográficas precisas, fechas correctas, fotografías auténticas y el respaldo de la comunidad de naturalistas (Callaghan *et al.,* 2020).

De acuerdo con los resultados obtenidos de íNaturalistMX, se identificaron coincidencias con 27 de las especies colectadas en campo. La dificultad para capturar la mayoría de las especies que no fueron colectadas, podría estar relacionada con su tamaño y la altitud a la que suelen volar, lo que complicó su captura. Por otro lado, las mariposas que se lograron colectar y que representan nuevos registros para Atotonilco de Tula son especies de tamaño mediano a pequeño. Esto sugiere que podrían pasar desapercibidas para los usuarios de la plataforma íNaturalistMX, especialmente las de menor tamaño, ya que las mariposas grandes suelen atraer más atención, lo que facilita su captura fotográfica.

Según los datos obtenidos de íNaturalistMX, la familia con mayor número de especies registradas fue Nymphalidae, con 22 especies, lo cual coincide con los hallazgos obtenidos en el campo, donde se observaron 12 especies. Esta familia es una de las más diversas en México, con 544 especies registradas (Llorente *et al.,* 2006), con gran variedad de hábitos alimentarios (Hernández-Mejía *et al.,* 2008a), altamente adaptada a entornos urbanos con conectivivdad de vegetación en el paisaje (Brown y Freitas, 2002; Molina-Martínez y León-Cortés, 2006). El aumento en la fragmentación del hábitat favorece a las especies generalistas, lo que se refleja en un incremento de su población a medida que el hábitat se ve alterado.

Dado que el primer registro de las especies de mariposas diurnas en Atotonilco de Tula fue en 2014, resulta complicado comprender cómo era la diversidad de mariposas anteriormente en este municipio con presencia de cementeras. Sin embargo, con la información obtenida, se pudo identificar que muchas de las especies en el municipio se encuentran clasificadas como indicadoras de disturbio.

De las 75 especies registradas en total, entre las reportadas en íNaturalistMX y las colectadas en campo, 25 se consideran indicadoras de disturbio, seis son indicadoras tanto de disturbio como de conservación, y solo cinco se clasifican como especies indicadoras de sitios conservados. Esto sugiere que Atotonilco de Tula es un municipio afectado por la contaminación, y que las mariposas presentes en la región son tolerantes a estas condiciones. Como señala Beteta (2019), las especies de mariposas más tolerantes y generalistas son las que presentan mayor abundancia y distribución en zonas urbanas.

9. CONCLUSIONES

Los análisis de diversidad alfa para el orden q^0 no revelaron diferencias significativas entre las áreas cercanas y lejanas a las cementeras en comparación con la vegetación nativa, en ambas épocas del año. Sin embargo, se observaron diferencias significativas en el orden q^1 durante la temporada de sequía, donde la diversidad ecológica fue mayor en la vegetación nativa en comparación con las zonas cercanas a las cementeras.

Se registró un elevado recambio de especies de mariposas diurnas entre las áreas cercanas y lejanas a las cementeras en comparación con la vegetación nativa. Estos hallazgos indican

que la industria cementera influye en la composición de las comunidades de mariposas, ya que la alteración del hábitat y la contaminación asociadas a esta actividad parecen favorecer la presencia de especies generalistas y tolerantes a disturbios antropogénicos, mientras que las especies más sensibles tienden a disminuir o desaparecer en estas zonas, impactando negativamente en la biodiversidad local. Este patrón de recambio evidencia cómo las actividades industriales pueden alterar la estructura de las comunidades biológicas, subrayando la importancia de implementar medidas de monitoreo y conservación en estos ecosistemas afectados.

La plataforma íNaturalistMX complementó el registro de especies que no fueron detectadas durante las colectas de campo, destacando el papel fundamental de la ciencia ciudadana en los estudios de biodiversidad. Los resultados obtenidos permitieron identificar que la mayoría de las especies presentes en Atotonilco de Tula pertenecen a la familia Nymphalidae, conocida por su capacidad para adaptarse a ambientes perturbados. Plataformas como íNaturalistMX no solo enriquecen las bases de datos sobre la diversidad de especies, sino que también representan una herramienta accesible y eficaz para monitorear la biodiversidad de mariposas en ecosistemas alterados, como los que rodean a las cementeras. Esta herramienta facilita la identificación de impactos ambientales a lo largo del tiempo, contribuyendo a una mejor comprensión y gestión de estos entornos.

10. RECOMENDACIONES

Se recomienda continuar con el monitoreo de mariposas diurnas en los alrededores de las cementeras, ampliando el número de áreas de muestreo que incluyan tanto áreas cercanas como distantes, así como más réplicas en áreas de vegetación nativa. Este monitoreo debería realizarse a lo largo de un año completo, con el fin de obtener datos más robustos y reducir los posibles sesgos presentes en la investigación actual. Esto permitirá generar mayor información y comprender mejor los efectos de la industria cementera sobre las mariposas, que son indicadores clave de la calidad ambiental.

11. LITERATURA CITADA

Álvarez, G. D. X. (2023). Video documental periodístico sobre la contaminación ambiental provocada por las actividades de la empresa Unión Cementera Nacional, en Guapán y sus alrededores. *Tesis de Licenciatura*. Universidad Politécnica Salesiana. Cuenca, Ecuador. 84 p.

Andrade-C, G. M. (1994). Estudio de conservación y biodiversidad de las mariposas en dos zonas de bosque primario y secundario en Colombia (Insecta: Lepidoptera). Madrid. *Shilap. Revista Lepidopterológica*. 22(86): 147-181.

Araujo, A. M. I. (2023). La Lucha Contra La contaminación atmosférica: El Caso De Las Pedreras En Los Cerros Las Mitras Y El Topo Chico, 1970-2015. *Bloch*. *Revista Estudiantil De Historia* 1(6): 127-47. https://revistabloch.uanl.mx/index.php/b/article/view/137

Azamar-Alonso y Téllez-Ramírez, I. (2022). Minería en México: panorama social, ambiental y económico. SEMARNAT y UAM. México. 188 p.

Balvanera, P. (2011). Los servicios ecosistémicos que proveen los bosques neotropicales. Alicante, España. *Ecosistemas.* 21(1-2) 136-147.

Baselga, A. (2010). Partitioning the turnover and nestedness components of beta diversity. *Global Ecology and Biogeography*. 19: 134-143.

Brown, Jr. K. S. y Freitas, L. A. V. (2002). Butterfly Communities of Urban Forest Fragments in Campinas, São Paulo, Brazil: Structure, Instability, Environmental Correlates, and Conservation. *Journal of Insect Conservation*. 6(4): 217-231.

Brown, K. S. y Hutchings, R. W. (1997) Disturbance, fragmentation, and the dynamics of diversity in Amazonian Forest butterflies. In: W. F. Laurance y Bierregaard, R. O, Jr. (Eds.) *Tropical Forest remnants: ecology, management, and conservation of fragmented communities* (91–110). Chicago, University of Chicago Press.

Burgos, N. A. (2009). Los orígenes del hormigón armado en España. *Tesis de Doctorado*. Universidad de Granada. Departamento de Expresión Gráfica Arquitectónica y en la Ingeniería. Madrid, España. 661 p.

Caballero, G. D. A. (2023). Las transformaciones del paisaje cultural en Atotonilco de Tula. Hidalgo, México. *GeoGraphos*. 14 (2): 217-251.

Calderón-Patrón, J. M. y Moreno, C. E. (2019). Diversidad beta basada en índices de disimilitud: Su partición en componentes de recambio y diferencias en riqueza. 203-222. En: Moreno, C. E. (eds.). La biodiversidad en un mundo cambiante: 101 Fundamentos teóricos y metodológicos para su estudio. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Hidalgo. México.

Callaghan, C. T., Ozeroff, I., Hitchcock, C. y Chandler, M. (2020). Capitalizing on opportunistic citizen science data to monitor urban biodiversity: a multi-taxa framework. *Biological Conservation*. 251 p.

Campos-Gallego, V., García-Zárate, M. A. y Arellano-García, M. E. (2016). Riesgo genotóxico en residentes próximos a la fábrica de Cemex México en Ensenada, B. C. C. Congreso de observatorios urbanos y desarrollo: Midiendo la Sustentabilidad. 16 p.

Cardim de Carvalho, A. (2001), Análisis del ciclo de vida de productos derivados del cemento. *Tesis de Doctorado*. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona. España. 317 p.

Carrasco-Gallegos, B. V., Arribas, U. C., Peralta, R. C., Leyva, G. L. M., Filgueiras, N. J. M., Valenzuela, A. A., Baro, S. J. E., Canchola, P. Y. G., Garatachia, R. J. C., Maya, S. G., Estrada, S. Y. C., Lagunes, H. A. J., Valencia, T. A., Adame, M. A., Sánchez, N. R. M., Herrera, T. L., Peña. B. L., Moreno, M. R. l., Bucio, M. S., Vieyra, M. J. A., Burgos, T. A. L., Peña, B. L., Herrera, T. L., Iniestra, F. P., Castro, C. J., Velazquez, T. D., Castillo, V. M. L., Padilla. S. L. S., De Sicilia, M. A., Chavelas, R. E. P., Dominguez, C. D. C., Guerrero, B. J. M., Espinosa, R. L. M., Balderas, P. M. A., González, H. E. C., Delgado, R. G. X., Santana, J. M. V., Calderon, M. J. R., Mundo, H. V., Balderas, P. M. A., Antonio, N. X., Manjarrez, S. F. J., Hernández, M. I. A., Canchola, P. Y. G., Parrot, J. F. Y. P. y Ramirez, N. C. (2017). Megaproyectos urbanos y productivos. Impactos socio-territoriales. Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca, México. 294 p.

Carvalho, C. J., Cardoso, P. y Gomes, P. (2012). Determining the relative roles of species replacement and species richness differences in generating beta-diversity patterns. *Global Ecology and Biogeography*. 21: 760-71.

Carvalho, C. J., Cardoso, P., Borges, V. P. A., Schmera, D. y Podani, J. (2013). Measuring fractions of beta diversity and their relationships to nestedness: a theoretical and empirical comparison of novel approaches. *Oikos*. 122: 825-34.

Castro-Bastidas, H. A. y Serrano-Serrano, J. M. (2022). La plataforma naturalista como herramienta de ciencia ciudadana para documentar la diversidad de anfibios en el estado de Sinaloa, México. *Revista Latinoamericana de Herpetología*. 5: 156-178.

Cerecer, O. J. A. y Valdés, P. E. (2022). Proceso de fabricación y composición química del cemento portland. *Tesis de Ingeniería*. Universidad Autónoma de Sinaloa. Mazatlán, Sinaloa. 128 p.

Cervantes, T. M. G., Bracho, R. L. y Breamauntz, F. A. (2005). Las partículas suspendidas en tres grandes ciudades mexicanas. *Gaceta Ecológica*. (74): 15-28.

Chao, A., Ma, H. K. y Hsieh, C. T. (2016). iNEXT (iNterpolation and EXTrapolation) Online: Software for Interpolation and Extrapolation of Species Diversity. Program and User's Guide published at http://chao.stat.nthu.edu.tw/wordpress/software_download/inext-online/

Clarke, R. K. y Gorley, N. R. (2015). PRIMER v7: User Manual/Tutorial. Plymouth, United Kingdom. PRIMER-E. 192 p.

Cleary, D. F. R. y Genner, M. J. (2006). Diversity patterns of Bornean butterfly assemblages. *Biodiversity and Conservation*. 15(1): 517-538.

Colwell, K. R. (2013). EstimateS: Statistical estimation of species richness and shared species from samples. Version 9.1. Available at. http://purl.oclc.org/estimates

Cuevas-Salgado, M. I., Rodríguez-Morales, M. P. y Romero-Nápoles, C. (2015). Infusiones botánicas para el control de *Leptophobia aripa elodia* Boisduval (Lepidoptera: Pieridae) en brócoli (*Brassica oleracea var. italica*) bajo condiciones de laboratorio. *Boletín de la Sociedad Mexicana de Entomología*. 1: 71-77.

Cumming, G., Fidler, F. y Vaux, L. D. (2007). Error bars in experimental biology. *Journal of Cell Biology*. 177(1): 7-11.

Dalmasso, A., Candia, R. y Llera, J. (1997). La vegetación como indicadora de la contaminación por polvo atmosférico. *Multequina*. (6): 85-91.

DeVries J. P., Austin, T. G. y Martin, H. M. (2009). Estimating species diversity in a guild of Neotropical skippers (Lepidoptera: Hesperiidae) with artificial lures is a sampling problem. *Insect Conservation and Diversity*. 2(2): 125-135.

DeVries, P. J. (1997). The butterflies of Costa Rica and their natural history II: Riodinidae. Nueva Jersey: *Princeton University Press*. 288 p.

Echeverría, S. C. M. (2022). Reduccion de las emisiones CO2 en la producción del cemento empleando piedra calcárea y arcillas calcinadas (LC3=limestone calcined clay cement). *Tesis de Maestría*. Universidad Politécnica de Catalunya. Barcelona, España. 73 p.

Emmel, T. C. y Austin, T. G. (1990). The tropical rain forest butterfly fauna of Rondônia, Brazil: species diversity and conservation. *Tropical Lepidoptera*. (Gainesville). 1(1): 1-12.

Enseñat, V. A. (1977). La industria del cemento dentro de la problemática de la contaminación atmosférica. *Materiales De Construcción*. 27(166-167): 221-241.

Fernández, B. B. A. y Hernández, S. K. A. (2008). Diagnóstico de la industria del cemento en Colombia y evaluación de alternativas tecnológicas para el cumplimiento de la norma de emisión de fuentes fijas. *Título de Ingeniería*. Universidad de La Salle. Bogotá. 154 p.

Fontenla, J. L. (1992). Biogeografía ecológica de las mariposas diurnas cubanas. Patrones generales. *Poeyana*. 427: 1-30.

Forero-Medina, G., Pinel, N., Chasqui Velasco, L. H., Clerici, N., López-Casas, S., Molina Prieto, L. F., Pinilla Herrera, M. C., Ríos Álzate, H. F., Rueda, M., Rinaudo Mannucci, M. E., Sánchez, A., Villegas Palacio, C. I., Villegas Palacio, J. C., Dávalos, L. M. y W. Ramírez. (2021). Motores directos de transformación y pérdida

de biodiversidad y de contribuciones de la naturaleza para la gente. En: Evaluación Nacional de Biodiversidad y Servicios Ecosistémicos de Colombia. Colombia. 706-837.

Fraija, F. N. y Fajardo, M. G. E. (2006). Caracterización de la fauna del orden Lepidóptera (Rhopalocera) en cinco diferentes localidades de los Llanos Orientales Colombianos. *Acta Biológica Colombiana*. 11(1): 55-68.

Fundación Internacional Amigos de la Tierra. (2018). Holcim en América Latina: Estudios de Caso. Observatorio Ambiental de Bogotá. Observatorio Ambiental de Bogotá. 32 p.

Galindo, A. (2021). Mexico: Butterfly Migration of Six Species Studied Using IAEA Data. International Atomic Energy Agency. *Atoms for Peace and Development*. https://www.iaea.org/newscenter/news/mexico-butterfly-migration-of-six-species-studied-using-iaea-data

García-Díaz, A. M., Salinas-Gutierrez, J. L., y Luis-Martínez, A. (2021). Mariposas diurnas. En: *La biodiversidad en Hidalgo. Estudio de Estado.* CONABIO, México. 239-245.

García-Salazar, E. M. (2020). El agua residual como generadora del espacio de la actividad agrícola en el Valle del Mezquital, Hidalgo, México. *Revista de alimentación contemporánea y desarrollo regional*. 29(54).

Glassberg, J. (2018). A swift guide to the butterflies of Mexico and Central America. Second Edition. *Sunstreak Books*. Morristown. 304 p.

Gobierno del estado de Hidalgo. (2017). Ajacuba. Municipios de Hidalgo. Archivado desde el original el 23 de marzo de 2017. Consultado el 22 de marzo de 2023. http://docencia.uaeh.edu.mx/estudios-pertinencia/docs/hidalgo-municipios/Ajacuba-Municipios-Del-Estado-De-Hidalgo.pdf

Gobierno del estado de Hidalgo. (2017). Atotonilco de Tula. Municipios de Hidalgo. Archivado desde el original el 26 de marzo de 2017. Consultado el 22 de marzo de 2023. http://docencia.uaeh.edu.mx/estudios-pertinencia/docs/hidalgo-municipios/Atotonilco-De-Tula-Enciclopedia-De-Los-Municipios.pdf

Gómez, G. C. y Peláez, P. J. (2020). Minería en México: Despojo, contaminación, conflictos y movilización. Diálogos Ambientales. *SEMARNAT* 55-61. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/581439/Miner_a_en_M_xico__Despojo_contaminaci_n_conflictos_y_movilizaci_n.pdf

Gómez, M. C. (2012). Cementera provocará graves daños en Hidalgo. *La Jornada*. https://desinformemonos.org/cementera-provocara-graves-danos-en-hidalgola-jornada5-de-noviembre/.

González, B. C. A. (2019). Uso y fabricación de bloques de cemento. Residuos del sector en Cuautla. *Tesina de Especialidad*. Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Cuernavaca, Morelos. 77 p.

González-Romero, A. y Rizo-Aguilar, A. (2012). Anfibios, reptiles y mamíferos del cerro Buenavista y la cantera Cuautlapan: inventario y monitoreo. pp. 181-217. En: C. Fragoso y P. Rojas (Eds.) Monitoreo ecológico de una cantera rehabilitada por cementos Holcim Apasco en Veracruz. INECOL y Holcim Apasco. México. 181-218.

Guerrero, N. A. y Ordoñez, C. C. E. (2013). Comparación de la estructura espacial en la comunidad de mariposas diurnas en sistemas de bosque seco premontano con diferentes grados de intervención, Reserva Natural el Charmolán (Buesaco Nariño). *Tesis de licenciatura*. Universidad de Nariño. San Juan de Pasto. Colombia 86 p.

Guerrero, O. V. A. (2019). Educación ambiental en la conservación de lepidópteros (Superfamilia: Papilionoidea), en la comunidad de Pimpilala-Cando, cantón Tenu, parroquia Talag, Provincia del Napo, 2019. *Tesis de licenciatura*. Universidad Central de Ecuador. Ecuador. 213 p.

Guzmán, J. M. N. y León, P. M. C. (2018). Evaluación del estado actual de flora y fauna en la concesión minera Congüime I regentada por la compañía Exploken S.A. cantón Paquisha, provincia de Zamora Chinchipe. *Título de Ingeniería*. Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador. 160 p.

Hall, J. P. W. y Harvey, D. J. (2002b). The phylogeography of Amazonia revisited: new evidence from riodinid butterflies. *Evolution*. 56(7): 1489-1497.

Hall, J. P. W. y Harvey, D. J. (2002c). A survey of androconial organs in the Riodinidae (Lepidoptera). *Zoological Journal of the Linnean Society*. 136(2): 171-197.

Hernández, A. M. (2020). Percepción social del riesgo por contaminación ambiental a causa de las cementeras y caleras, en Atotonilco de Tula, Hidalgo, y Apaxco, Estado de México. *Tesis de Licenciatura*. Universidad Autónoma del Estado de México. Estado de México, México. 167 p.

Hernández, O. M. E. (2021). Análisis de la biodiversidad de Lepidópteros diurnos de la Reserva de la Biosfera Barranca de Metztitlán, Hidalgo. *Tesis de Maestría*. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Mineral de la Reforma, México. 132p.

Hernández-Mejía, C. B., Llorente-Bousquets, J., Vargas-Fernández, I. y Luis-Martínez, A. (2008a). Las mariposas (Hesperioidea y Papilionoidea) de Malinalco, Estado de México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*. 79(1): 117-130.

Hochmair, H. H., Scheffrahn, R. H., Basille, M. y Boone, M. (2020). Evaluating the data quality of iNaturalist termite records. *PLOS One* 15(5): e0226534.

iNaturalist community. Observaciones de Papilionoidea de Atotonilco de Tula, México. Observadas entre 2014 a 2023. Exportada de https://www.inaturalist.org/projects/mariposas-diurnas-de-atotonilco-de-tula

Jones, E. L. y Leather, S. R. (2012). Invertebrates in urban areas: A review. *European Journal of Entomology*. 109(4): 463-478.

Jost, L. (2006). Entropy and diversity. *Oikos* 113(2): 363-375.

Legal, L., Valet, M., Dorado, O., Jesus-Almonte, J. M., López, K. y Céreghino, R. (2020). Lepidoptera are relevant bioindicadors of passive regeneration in tropical dry forest. *Diveersity*. 12(6), 231.

León-Velez, A. y Guillén-Mena, V. (2019). Energía contenida y emisiones de CO2 en el proceso de fabricación del cemento en Ecuador. *Ambiente Construído*. 10: 611-625

Llorente-Bousquets, J., Luis-Martínez, A. y Vargas Fernández, I. (2006). Apéndice general de Papilionoidea: Lista sistemática, distribución estatal y provincias biogeográficas.

945-1009. En: Morrone, J. J. y J. Llorente Bousquets (Eds.), Componentes bióticos principales de la entomofauna mexicana, Vol. II. Las Prensas de Ciencias, UNAM, México, D. F.

Llorente-Bousquets, J., Vargas-Fernández, I., Luis-Martínez, A., Trujano-Ortega, M., Hernández-Mejía, Blanca Claudia y Warren, A. D. (2014). Biodiversidad de Lepidoptera en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*. 85: 353-371.

Luis-Martínez, A., Ávalos-Hernández, O., Trujano-Ortega, M., Arellano-Covarrubias, A., Vargas-Fernández, I. y Llorente-Bousquets, J. (2022). Distribution, diversity, endemism, and ecology of Nymphalid butterflies (Lepidoptera: Nymphalidae) in the Loxicha Region, Oaxaca, Mexico. *Revista de Biología Tropical*. 70(1): 363-407.

Macedo, A. G. (2016.). Rehabilitación de canteras y su entorno en el municipio de La Paz. *Tesis de licenciatura*. Universidad de la República Uruguay. Facultad de Ciencias. 172 p.

Magurran, E. A. (2004). Measuring Biological Diversity. *Blackwell Publishing*. 261 p.

Manson, R. H., Jardel, P. E. J., Jiménez, E. M. y Escalante, S. C. A. (2009). Perturbaciones y desastres naturales: impactos sobre las ecorregiones, la biodiversidad y el bienestar socioeconómico. En *Capital natural de México*, *volumen II*: *Estado de conservación y tendencias de cambio*. CONABIO, México. 131-184.

Márquez, L. P. C. (2014). Lepidópteros (Rhopaloceros) bioindicadores de tres tipos de bosques del Distrito de San Juan Bautista, Loreto - Perú, 2013. *Tesis de Ingeniería*. Universidad Nacional de la Amazonia Peruana. Iquitos, Perú. 76 p.

Martínez, J. E. (2018). Visualizador web de la incidencia de cáncer en el Valle del Mezquital, México y su relación con la contaminación de industrias cementeras. *Tesis de maestría*. Universidad Autónoma del Estado de México. Estado de México. México.

Martínez, L. M. (2020). Industria cementera en México: Sin señales de recuperación a pesar de tocar fondo el año pasado. Nueva York. *S&P Global Ratings*. 6 p.

Mayó, C. C. (2015). El cemento natural en el Madrid de los siglos IXI y XX. Identificación de sus aplicaciones, estado de conservación y compatibilidad con los cementos actuales. *Tesis Doctoral*. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid. 314 p.

Meléndez-Jaramillo, E., Cantú-Ayala, C. M., Treviño-Garza, E. J., Sánchez-Reyes, U. J. y Herrera-Fernández, B. (2021). Composición y diversidad de mariposas (Lepidoptera, Papilionoidea) a lo largo de un gradiente de contaminación atmosférica en la Zona Metropolitana de Monterrey, México. *ZooKeys*. 1037: 73-103

Molina-Martínez, A. y León-Cortés, J. L. (2006). Movilidad y especialización ecológica como variables que afectan la abundancia y distribución de lepidópteros papilionidos en el sumidero, Chiapas, México. *Acta Zoológica Mexicana*. 22(3): 29-52.

Monasterio, Y., Vicente, A. J. A., Escobedo, E. R., Moreno, I. O. y Parra, A. B. (2015). La Rioja una región privilegiada para las mariposas. *Belezos, Revista de cultura popular y tradiciones de La Rioja*. 27: 36-43

Montes de Oca-Risco. A., Carcassés, U. M., Reyes Chacón. y Castañeda, S. A. L. (2018). Diagnóstico ambiental de la cantera Yarayabo provincia Santiago De Cuba, Cuba. *HOLOS*. 1, 30-49.

Moore, N. W. (1975). Butterfly transects in a linear hábitat 1964-1973. *Entomologist's Gazette.* 26: 71-78.

Moreno, C. E. (2001). Métodos para medir la biodiversidad. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo. Oficina Regional de Ciencia y Tecnología para América Latina y el Caribe de UNESCO. *Sociedad Entomológica Aragonesa*. Serie Manuales y Tesis SEA. 1:84 p.

Moyers-Arévalo, R. L. (2009). Fenología de mariposas diurnas de la Reserva del Pedregal de San Ángel, D. F. y su relación con la fenología floral y otros factores ambientales. *Tesis de Licenciatura*. Universidad Nacional Autónoma de México, México. 61 p.

Murillo-Hiller, L. R. (2008). Clave dicotómica para la identificación de las familias de mariposas (Rhopalocera) pertenecientes a las superfamilias Papilionoidea y Hesperioidea. Métodos en Ecología y Sistemática, 3(2), 6-11.

Mutlu, S., Ökkeş, A. y Kaya, Y. (2009) Effect of cement dust on diversity andantioxidant enzyme activities of plants growing around a cement factory. *Fresenius Environmental Bulletin*. 18(10): 1823-1827.

Noguera, B. (2020). *Proceso de fabricación del cemento*. Ingeniería Química. https://www.ingenieriaquimicareviews.com/2020/11/proceso-de-fabricacion-del-cemento.html

Ombugadu, A. Ugwu, A. R., Ibrahim, J. I., Dawam, N. N., Pam, V. A., Okoi, P. N., Ahmed, H. O., Deme, G. G., Njila, H. L., Echor, B. O., Aimankhu, P. O., Mafuyai, M. J., Maikenti, J. I., Nkup, C. D., Uzoigwe, N. R. y Oke, O. C. (2021). A comparative study on the abundance anddiversity of butterflies in disturbed and undisturbed habitats in a ter-tiary institution in Central Nigeria. *MOJ Ecology and Environmental Science*, 6(6): 194-199.

Orta, S. C., Reyes-Agüero, J. A., Luis-Martínez, M. A., Muñoz-Robles, C. A. y Méndez, C. H. (2022). Las mariposas bioindicadoras ecológicas de México. *Acta Zoológica Mexicana*. 38(1) 1-33.

Osborne, K. H. y Longcore, T. (2021). Effect of gypsum dust on lepidopterous larvae. *Ecotoxicol Environ Saf*. 228:113027.

Ospina, L. A. (2014) Estructura de la comunidad de mariposas diurnas (Lepidoptera: Hesperioidea y Papilionoidea) en distintos tipos de hábitats en la cuenca del Río Lagunillas (Tolima - Colombia). *Tesis de maestría*, Universidad Nacional de Colombia. Colombia. 110 p.

Otto, H. H. H. (2014). A new locality and larval host plant recorded for *Brephidium exilis exilis* (Boisduval, 1852) on the Arabian Peninsula. *Lepidopterists Society of Africa*. 25: 97-99.

Palacios-Mayoral, V. D., Palacios-Mosquera, L. y Jiménez-Ortega, A. M. (2018). Diversidad de mariposas diurnas (Lepidoptera: Papilionoidea) asociadas con tres hábitats en el corregimiento de Pacurita, municipio de Quibdó, Chocó, Colombia. *Revista De La Academia Colombiana De Ciencias Exactas, Físicas Y Naturales*. 42(164): 237-245.

Pellecchia M. y Negri I. (2018). Particulate matter collection by honey bees (*Apis mellifera*, L.) near to a cement factory in Italy. *PeerJ*. 24:6e5322.

Pérez, S., Madrid, S. y Merino, L. (2021). Bosques comunitarios y minería en México. *Consejo Civil Mexicano para la Silvicultura Sostenible*.

Pérez-Jarillo, E. B. (2017). Diversidad de mariposas en un gradiente de urbanización en la Zona Metropolitana de Pachuca, Hidalgo, México. *Tesis de licenciatura*. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Mineral de la Reforma, México. 112 p.

Pittaway, A. R., Larsen, T. B., Legrain, A., Majer, J., Weidenhoffer, Z. y Gillet, M. (2006). The establishment of an American butterfly in the Arabian Gulf: *Brephidium exilis* (Boisduval, 1852) (Lycaenidae). *Nota lepidopterologica*. 29(1/2): 5-16.

Pozo, C., Luis-Martínez, A., Llorente-Bousquets, J., Salas-Suárez, N., Maya-Martínez, A., Vargas-Fernández, I. y Warren, A. D. (2008). Seasonality and phenology of the butterflies (Lepidoptera: Papilionoidea and Hesperioidea) of Mexico's Calakmul Region. *Florida Entomologist*. 91(3): 407-422.

Prieto, C. y Dahners, W. H. (2006). Eumaeini (Lepidoptera: Lycaenidae) del cerro San Antonio: Dinámica de la riqueza y comportamiento de ''Hilltopping''. *Revista Colombiana de Entomología*. 32(2), 179-190.

Prieto, L. D. (2016). Evaluación de la rentabilidad de la producción de Cemento de Bajo Carbono a partir de la comparación de las metodologías tradicionales, y el Return on Capital Employed: ROCE. *Tesis de Diploma*. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba.

Quintana, C. B. y López, P. R. (2019). Diversidad de aves en ambientes antrópicos en una localidad del semidesierto del centro de México. *Huitzil*. 21(2).

R Development Core Team. (2023). R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna.

Ramírez-Ponce, A., Calderón-Patrón, J. M., Guzmán, V. H. M. y Moreno, C. E. (2019). Biotic heterogeneity among scarab beetle communities in an anthropized landscape

in the Central Valleys of Oaxaca, Mexico. *Journal of Insect Conservation*. 23.765-776.

Ramón, M. A. (2014). Estudio del sector cementero a nivel mundial y nacional, con particularización de una empresa cementera situada en la Comunidad Valenciana. *Trabajo de Fin de Carrera*. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia.

Rincón, S. I., Servodio, M. V. J. A. y Oropeza, F. E. D. (2023). Proceso productivo y costos medioambientales en empresas cementeras en el estado Zulia. *Consensus – Santiago*. 7(1): 61-81.

Rivas, P. (2019). Cemento, la industria que contribuye más a la crisis climática que toda la flota global de camiones. *El Salto*. https://www.elsaltodiario.com/cambio-climatico/cemento-industria-contribuye-crisis-climatica-flota-global-camiones

Rodrigues, C. D. S. (2019). Ideas conceptuales acerca del potencial del depósito arcilloso centeno para la producción de cemento de bajo carbono en el municipio Moa. *Tesis de ingeniería*. Universidad de Moa. Cuba.

Rodríguez, L. V. G. (2021). Lepidópteros diurnos como bioindicadores en sitios con características ambientales contrastantes en el Valle de San Luis Potosí, S.L.P. *Tesis de Maestría*. San Luis Potosí. 124 p.

Sada, M. y Madero, F. A. (2011). Guía de mariposas de Nuevo León. Fondo Editorial de Nuevo León. https://www.fondoeditorialnl.gob.mx/pdfs/Guiamariposas.pdf

Salomón, G. A. (2006). La industria del cemento. Banco Nacional de Comercio Exterior. *Comercio Exterior*. 56(9): 812-824.

Sanjuán, B. M. A. y Chinchón Y. S. (2014). Introducción a la fabricación y normalización del cemento Portland. San Vicente del Raspeig. Universidad de Alicante. 181 p.

Schneider, C. y Fry, G. L. A. (2001). The influence of landscape grain size on butterfly diversity in grasslands. *Journal of Insect Conservation*. 5(3): 163-171.

Scott, J. A. y Epstein, M. E. (1987). Factors affecting phenology in a temperate insect community. *American Midland Naturalist*. 117(1): 103-118.

SEMARNAT, (2010). Tramites-Rubro 3. Coprocesamiento de residuos peligrosos industriales. https://www.gob.mx/semarnat/documentos/empresas-autorizadas-para-el-manejo-de-residuos-peligrosos

SEMARNAT. CONAFOR, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Comisión Nacional Forestal. (2015). Inventario Estatal Forestal y de Suelos-Hidalgo 2014. Colección de Inventarios Estatales Forestales y de Suelos 2013-2014. México. 172 p.

Servicio Geológico Mexicano (SGM). (2020). Panorama Minero del Estado de Hidalgo. https://www.sgm.gob.mx/Gobmx/productos/panoramas/HIDALGOdic2020.pdf

Silva, M. E. y Rodríguez, A. (2022). El flujo de materiales en las ciudades: el cemento. *Fronteras*. 18: 38-43.

Snell-Rood, E. C. y Kobiela, M. E. (2023). Rearing the Cabbage White Butterfly (Pieris rapae) in Controlled Conditions: A Case Study with Heavy Metal Tolerance. *J Vis Exp*. 18:(198).

Summerville, K. S. y Crist, T. O. (2008). Structure and conservation of Lepidopteran communities in managed forests of northeastern North America: a review. *The Canadian Entomology*. 140: 475-494.

Thomas, C. D. (1991). Habitat use and geographic ranges of butterflies from the wet lowlands of Costa Rica. *Biological Conservation*. 55(3): 269-281.

Trejo, I. y Dirzo, R. (2002). Floristic diversity of Mexican seasonally dry tropical forest. *Biodiversity and Conservation*. 11: 2063-2084.

Tzintzun, C. M. G., Rojas, B. L., y Fernández, B. A. (2005). Las partículas suspendidas en tres grandes ciudades mexicanas. *Gaceta Ecológica*. (74): 15-28.

Van Nieukerken, E. J., Kaila, L., Kitching, I. J., Kristensen, N. P., Lees, D. C., Minet, J., Mitter, C., Mutanen, M., Regier, J. C., Simonsen, T. J., Wahlberg, N., Yen, S-H., Zahiri, R., Adamski, D., Baixeras, J., Bartsch, D., Bengtsson, B. A., Brown, J. W., Bucheli, S. R., Davis, D. R., De Prins, J., De Prins, W., Epstein, M. E., Gentilipoole, P., Hättenschwiler, C. G. P., Hausmann, A., Holloway, J. D., Kallies, A., Karsholt, O., Kawahara, A. Y., Koster, S. (J.C.), Kozlov, M. V., Lafontaine, J. D., Lamas, G.,

Landry, J. F., Lee, S., Nuss, M., Park, K-T., Penz, C., Rota, J., Shintlmeister, A., Schmidt, B. C., Sohn, J. C., Solis, M. A., Tarmann, G. C., Warren, A. D., Weller, S., Yakovlev, R. V., Zolotuhin, V. V. y Zwick, A. (2011). Order Lepidoptera (Linnaeus, 1758). En: Zhang, Z. Q. (Ed.) Animal biodiversity: An outline of higher-level classification and survey of taxonomic richness. *Zootaxa*. 3148: 212-221.

Vanderstock, A. M., Latty, T., Leonard, R. J. y Hochuli, D. F. (2019). Mines over matter: Effects of foliar particulate matter on the herbivorous insect, *Helicoverpa armigera*. *J Appl Entomol*. 143: 77-87.

Vargas-Fernández, I. (1998). Distribución de los Papilionoidea (Lepidóptera: Rhopalocera) de la Sierra de Manantlán (250-1650 m) en los estados de Jalisco y Colima. *Tesis de maestría*. Universidad Nacional Autónoma de México. México. 101 p.

Vargas-Fernández, I., Warren, A. D., Luis-Martínez, A. y Llorente-Bousquets, J. E. (2016). Mariposas diurnas (Rhopalocera). En: *La Biodiversidad en Colima. Estudio de Estado*. México. 366-375.

Vásquez, B., y Corrales, S. (2016). Industria del cemento en México: Análisis de sus determinantes. *Problemas del Desarrollo*. 188(48): 113-138.

Ventura, C. C. N. (2019). Cementeras: La falsedad del desarrollo territorial, reducción de bienes ambientales y la violencia de los derechos fundamentales de las mujeres. *Heinrich Böll Stiftung*. 15 p.

Vera, M. P. (2013). Análisis de las variables que influyen en la opinión de los habitantes de la región Tula-Atotonilco-Apaxco sobre la gestión ambiental y los impactos relacionados con la fabricación de cemento. XVIII Congreso Internacional de Contaduría Administración e Informática. https://investigacion.fca.unam.mx/docs/memorias/2013/9.01.pdf

Warren, A. D. (2000). Hesperioidea (Lepidoptera). En Llorente-Bousquets, J., González, E.S. y Papavero, N. (Eds.). Biodiversidad, Taxonomía y Biogeografía de Artrópodos de México: Hacia una Síntesis de su Conocimiento, vol. II. *Las Prensas de Ciencias, Facultad de Ciencias*, UNAM. 535-580 p.

Warren, A. D., Davis, K. J., Grishin, N. V., Pelham, J. P., Stangeland, E. M. (2012). Interactive Listing of American Buttlerflies. http://butterfliesofamerica.com/

Warren, A. D., K. J. Davis, E. M. Stangeland, J. P. Pelham, K. R. Willmott y N. V. Grishin. (2024). Illustrated Lists of American Butterflies. http://www.butterfliesofamerica.com/

Zurilla, M. Z. (2020). Ruido y medio natural. Especial referencia a los espacios naturales protegidos. *Revista de la Escuela Jacobea de Posgrado*. (18): 79-92.

12. ANEXOS

Anexo 1. Fotografías de las especies de mariposas diurnas colectadas en campo. Se incluye el nombre de las especies de acuerdo al arreglo taxonómico actualizado de Warren et al. (2024) del catálogo en línea: Butterflies of America (http://butterfliesofamerica.com/). Asimismo, presenta la zona y municipio donde se colectaron (Cem_A, Cem_B, For_Am For_B y Veg_nat). El tamaño de la fotografía no representa el tamaño real de las especies. Se incluye el nombre de la familia, subfamilia, tribu y especie.

FAMILIA PAPILIONIDAE (Latreille, 1802)

Subfamilia

Papilioninae

Tribu

Troidini (Talbot, 1939)

Battus philenor philenor

For_A, Atotonilco de Tula

Tribu

Papilionini (Latreille, 1802)

Heraclides pharnaces

For_A, Atotonilco de Tula

Papilio polyxenes asterius

Veg_nat, Ajacuba

FAMILIA PIERIDAE (Swainson, 1820)

Subfamilia

Coliadinae (Swainson, 1821)

Abaeis mexicana mexicana

Cem_A, Atotonilco de Tul

Abaeis salome jamapa

Cem_A, Atotonilco de Tula

Nathalis iole iole

For_B, Atotonilco de Tula

Nathalis iole iole

Cem_A, Atotonilco de Tula

Phoebis marcellina

Cem_B, Atotonilco de Tula

Pyrisitia nise nelphe

For_B, Atotonilco de Tula

Pyrisitia westwoodii

Cem_A, Atotonilco de Tula

Zerene cesonia cesonia

For_A, Atotonilco de Tula

Subfamilia

Pierinae (Swainson, 1820)

Tribu

Pierini (Swainson, 1820)

Archonias nimbice nimbice

Veg_nat, Ajacuba

Leptophobia aripa elodia

Veg_nat, Ajacuba

Pieris rapae rapae

Cem_B, Atotonilco de Tula

Pontia protodice

Cem_A, Atotonilco de Tula

FAMILIA LYCAENIDAE (Leach, 1815)

Subfamilia

Polyommatinae (Swainson, 1827)

Tribu

Polyommatini (Swainson, 1827)

Brephidium exilis exilis

Veg_nat, Ajacuba

Brephidium exilis exilis

For_A, Atotonilco de Tula

Echinargus isola

For_A, Atotonilco de Tula

Echinargus isola

For_B, Atotonilco de Tula

Icaricia lupini texanus

Cem_A, Atotonilco de Tula

Icaricia lupini texanus

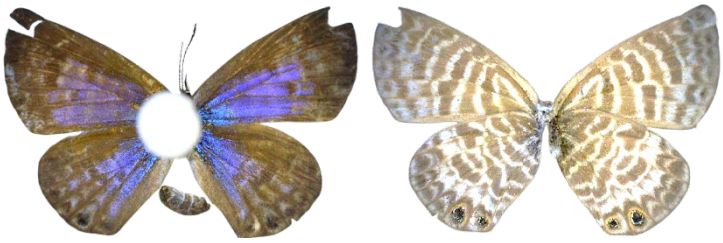
Cem_B, Atotonilco de Tula

Leptotes marina

For_A, Atotonilco de Tula

Leptotes marina

For_A, Atotonilco de Tula



Subfamilia

Theclinae

Tribu

Eumaeini (Swainson, 1827)

Strymon cestri

Veg_nat, Ajacuba

Strymon istapa istapa

For_B, Atotonilco de Tula

Strymon melinus

For_B, Atotonilco de Tula

Ministrymon leda

Veg_nat, Ajacuba

FAMILIA RIODINIDAE (Grote, 1895)

Subfamilia

Riodininae (Grote, 1895)

Tribu

Riodinini (Grote, 1895)

Lasaia maria anna

Veg_nat, Ajacuba

Calephelis sp1

Veg_nat, Ajacuba

Calephelis sp1

Veg_nat, Ajacuba

FAMILIA NYMPHALIDAE (Rafinesque, 1815)

Subfamilia

Danainae (Boisduval, 1833)

Tribu

Danaini (Boisduval, 1833)

Danaus eresimus montezuma
For_B, Atotonilco de Tula

Danaus gilippus thersippus
For_A, Atotonilco de Tula

Danaus gilippus thersippus
Cem_B, Atotonilco de Tula

Subfamilia

Heliconiinae (Swainson, 1822)

Tribu

Heliconiini (Swainson, 1822)

Dione moneta poeyii
For_B, Atotonilco de Tula

Dione vanillae incarnata

For_A, Atotonilco de Tula

Heliconius charithonia vazquezae

For_B, Atotonilco de Tula

Tribu

Argynnini (Swainson, 1833)

Euptoieta claudia daunius

Cem_A, Atotonilco de Tula

Euptoieta hegesia meridiania
For_A, Atotonilco de Tula

Subfamilia

Nymphalinae (Rafinesque, 1815)

Tribu

Melitaeini (Newman, 1870)

Anthanassa texana
For_A, Atotonilco de Tula

Chlosyne lacinia lacinia
Cem_B, Atotonilco de Tula

Phyciodes graphica graphica
For_B, Atotonilco de Tula

Microtia elada elada

Veg_nat, Ajacuba

Tribu

Nymphalini (Rafinesque, 1815)

Nymphalis antiopa antiopa

For_B, Atotonilco de Tula

Vanessa annabella

For_A, Atotonilco de Tula

FAMILIA HESPERIIDAE (Latreille, 1809)

Subfamilia

Eudaminae (Latreille, 1809)

Tribu

Eudamini (Latreille, 1809)

Autochton caballo

For_B, Atotonilco de Tula

Codatractus arizonensis

Veg_nat, Ajacuba

Codatractus arizonensis

Veg_nat, Ajacuba

Subfamilia

Hesperiinae (Latreille, 1809)

Tribu

Hesperiini (Latreille, 1809)

Ancyloxypha arene

Cem_B, Atotonilco de Tula

Atalopedes huron

For_B, Atotonilco de Tula

Oarisma minima

Cem_B, Atotonilco de Tula

Hylephila phyleus phyleus

Cem_B, Atotonilco de Tula

Lon vitellina

For_B, Atotonilco de Tula

Subfamilia

Heteropterinae (Aurivillius, 1925)

Tribu

Heteropterini (Latreille, 1809)

Piruna sp1

Cem_B, Atotonilco de Tula

Piruna sp2

Cem_A, Atotonilco de Tula

Subfamilia

Pyrginae (Burmeister, 1878)

Tribu

Carcharodini

Pholisora mejicanus

Veg_nat, Ajacuba

Staphylus tepeca

Cem_B, Atotonilco de Tula

Tribu

Erynnini

Chiothion georgina georgina

Veg_nat, Ajacuba

Gesta funeralis

For_B, Atotonilco de Tula

Tribu

Pyrgini (Burmeister, 1878)

Burnsius sp

Veg_nat, Ajacuba

Heliopetes laviana laviana

Veg_nat, Ajacuba

Systasea pulverulenta

Veg_nat, Ajacuba