

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE CIENCIAS

**MODELIZACIÓN DE LA DINÁMICA TEMPORAL DE POBLACIONES
DE INSECTOS**

**TRABAJO DE TITULACION PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO EN CIENCIAS ECONÓMICAS Y FINANCIERAS**

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

JASON PAUL OBANDO ROMERO

jason.obando@epn.edu.ec

DIRECTOR: DAVID A. DONOSO, PhD

david.donosov@epn.edu.ec

CODIRECTORA: Ing. YASMÍN SALAZAR MÉNDEZ, PhD

yasmin.salazar@epn.edu.ec

QUITO, DICIEMBRE 2021

Declaración

Yo, Jason Paul Obando Romero, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de esta declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de la Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.

Jason Paul Obando Romero

Certificación

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por Jason Paul Obando Romero, bajo nuestra supervisión.



Firmado electrónicamente por:
**DAVID ANDRES
DONOSO VARGAS**

David A. Donoso, PhD
Director

**YASMIN
SALAZAR
MENDEZ**

Firmado digitalmente por YASMIN
SALAZAR MENDEZ
Número de reconocimiento DINI: C=EC,
serialNumber=1001719796, ou=SALAZAR
MENDEZ, cn=YASMIN SALAZAR MENDEZ,
1.3.6.1.4.1.31.442.104.1001719796,
givenName=YASMIN,
email=yasmin.salazar@gmail.com,
c=Perú, o=Qualis, ou=Certificado de
Clase 2 de Persona Física EC
Fecha: 2021.12.07 12:41:45 -05'00'

Yasmín Salazar Méndez, PhD
CoDirectora

Agradecimientos

A mis padres César y Flora, por regalarme la vida y ser quienes han estado siempre para mí, apoyándome en todas las decisiones que he tomado y siendo mi modelo a seguir. Gracias por formarme con valores para ser una buena persona y enseñarme que la fuerza del amor puede con todo. Nunca me falten.

A mi ángel, Freddy, siempre has estado aquí.

A mis hermanos Fanny, Betty y Henry, por estar conmigo en todas las etapas de mi vida y acompañarme siempre con sus consejos. Han sido parte importante de mi formación y estoy seguro que sin ustedes no podría seguir.

A Bexy, quien ha sido mi compañera en toda mi vida universitaria, por siempre estar para mí. Ser una persona muy especial y con quien he compartido mucho.

A mis sobrinos, porque siempre me han podido sacar una sonrisa y sé que siempre han estado pendientes de mí. A Diana S. y Diana R., por siempre apoyarme y estar con sus consejos.

A mis tutores de tesis, Dra. Yasmín Salazar y Dr. David Donoso, por confiar en mí. Me han enseñado que por encima del trabajo está la persona.

Jason

Dedicatoria

A César y Flora.

Índice general

Índice de Figuras	I
Índice de Tablas.....	III
Resumen	IV
Abstract.....	V
1. Introducción.....	6
1.1. Planteamiento del Problema	6
1.2. Justificación	8
1.3. Objetivo General.....	10
1.4. Objetivos Específicos.....	10
2. Marco Teórico	11
2.1. Los insectos en la economía	11
2.2. Factores que explican la abundancia de insectos	12
2.2.1. Enfoque taxonómico.....	12
2.2.2. Enfoque climático.....	14
2.2.3. Enfoque estacional.....	14
2.2.4. Enfoque geográfico.....	15
2.2.5. Enfoque de disturbación (el rol del ser humano).....	16
2.3. Declinación de insectos en el mundo.....	18
2.4. Hipótesis	19
3. Datos y metodología.....	20
3.1. Descripción del lugar	20
3.2. Base de datos.....	21
3.2.1. Datos (Abundancia de insectos).....	21

3.2.2.	Variables Climáticas.....	24
3.2.3.	Variables estacionales.....	24
3.3.	Estadística descriptiva.....	25
3.3.1.	Variación de la abundancia de insectos.....	25
3.3.2.	Variación de las variables climáticas.....	31
3.3.3.	Relación de las variables climáticas con la abundancia de insectos.....	32
3.4.	Metodología.....	36
3.4.1.	Box-Jenkins.....	36
3.4.2.	GLM.....	38
4.	Resultados y Discusión.....	40
4.1.	Box-Jenkins.....	40
4.1.1.	Identificación, estimación y diagnóstico.....	40
4.1.2.	Pronóstico.....	56
4.2.	GLM.....	62
4.2.1.	Validación.....	62
4.2.2.	Resultados de GLM.....	64
5.	Discusión y Conclusiones.....	70
5.1.	Box-Jenkins.....	70
5.2.	GLM.....	72
6.	Recomendaciones.....	76
	Bibliografía.....	78
	Anexos.....	88

Índice de Figuras

Figura 3.1. Mapa Barro Colorado y lugares de recolección.	21
Figura 3.2. Abundancia de insectos periodo 2009-2019 en Barro Colorado.	25
Figura 3.3. Tendencia de la abundancia de insectos periodo 2009-2019.	27
Figura 3.4. Abundancia de Coleoptera en la Isla Barro Colorado.	28
Figura 3.5. Dinámica de los mínimos de abundancia entre recolecciones.	29
Figura 3.6. Dinámica de los mínimos de abundancia entre recolecciones.	30
Figura 3.7. Dinámica de las variables climáticas en Barro Colorado.	31
Figura 3.8. Correlaciones anuales de las series con cuatro recolecciones al año	33
Figura 3.9. Correlaciones estacionales de las series con cuatro recolecciones al año.	34
Figura 3.10. Correlaciones Anuales	35
Figura 4.1. FAS Y FAP Coleoptera.	41
Figura 4.2. FAS y FAP de la serie Coleoptera Diferenciada.	42
Figura 4.3. Diagnóstico Coleoptera	44
Figura 4.4. FAS Y FAP Hemiptera	45
Figura 4.5. Diagnóstico Hemiptera.	46
Figura 4.6. FAS y FAP serie Lepidoptera	46
Figura 4.7. Diagnóstico Lepidoptera	47
Figura 4.8. FAS y FAP Hymenoptera	48
Figura 4.9. FAS y FAP Hymenoptera diferenciada estacional.	48
Figura 4.10. Diagnóstico Hymenoptera.	49
Figura 4.11. FAS y FAP Formicidae LT	50
Figura 4.12. Diagnóstico Formicidae LT	50
Figura 4.13. FAS y FAP Isoptera LT I.	51
Figura 4.14. Diagnóstico Isoptera LT I	52
Figura 4.15. FAS y FAP Isoptera LT II.	53
Figura 4.16. Diagnóstico Isoptera LT II.	53

Figura 4.17. FAS y FAP Isoptera	54
Figura 4.18. Diagnóstico Isoptera.....	55
Figura 4.19. FAS y FAP Formicidae.....	55
Figura 4.20. Diagnóstico Formicidae	56
Figura 4.21. Tendencia resultados series trimestrales.	57
Figura 4.22. Pronóstico Formicidae.	61
Figura 4.23. Pronóstico Isoptera.....	62

Índice de Tablas

Tabla 2.1. Resumen de los determinantes de la dinámica de insectos	17
Tabla 2.2. Resumen de los hallazgos previos reportados por la evidencia empírica	18
Tabla 3.3. Composición de las series	22
Tabla 3.4. Descripción de las recolecciones.....	23
Tabla 3.5. Métodos de recolección.....	23
Tabla 3.6. Unidades de medida de las variables climáticas.....	24
Tabla 4. 1. Resultados de la Prueba de Dickey-Fuller aumentada	41
Tabla 4.2. Elección de modelos considerando los criterios de información	43
Tabla 4.3. Pronóstico series trimestrales	58
Tabla 4.4. Resumen pronóstico series anuales	60
Tabla 4.5. Resumen prueba de dispersión	63
Tabla 4.6. Efecto de las variables climáticas y estacionales en la abundancia de insectos series trimestrales.....	65
Tabla 4.7. Efecto de las variables climáticas en la abundancia de insectos series anuales ..	69

Resumen

Los insectos cumplen funciones esenciales para la vida humana como la polinización, transmisión de energía o control biológico. Publicaciones recientes sugieren la disminución en abundancia de insectos en ciertas partes del mundo. Esta investigación tiene como finalidad determinar el comportamiento de la abundancia de insectos en un ambiente tropical mediante 1) la modelización univariada ARIMA de las series de tiempo y 2) la especificación de modelos lineales generalizados para encontrar las variables ambientales y estacionales que tienen influencia en cada una de las series de tiempo estudiadas. El trabajo de campo fue realizado en la isla de Barro Colorado en Panamá, partiendo de la hipótesis de que la abundancia de insectos cambia en el tiempo, y se relaciona con la temperatura ambiental. Los análisis encontraron que la abundancia de cada grupo de insecto pronostica una tendencia diferente, con Isoptera LT II subiendo, Hymenoptera bajando y Coleoptera, Hemiptera, Lepidoptera, Formicidae LT, Isoptera LT I, Isoptera y Formicidae manteniéndose en el tiempo. El cambio de abundancia se asocia al efecto estacional presente en seis de las siete series posibles. Además, entre los factores climáticos, principalmente la temperatura tuvo influencia en la abundancia de insectos. Este estudio sugiere que la abundancia de los insectos en zonas tropicales, y todas las funciones esenciales que ellos proporcionan a los humanos, podría cambiar en el futuro si existe un cambio climático.

Palabras clave: Armagedón ecológico; ARIMA; modelos lineales generalizados.

Abstract

Insects perform essential functions for human life such as pollination, energy transmission or biological control. Recent publications suggest a decrease in insect abundance in certain parts of the world. This research aims to determine the behavior of insect abundance in a tropical environment by 1) univariate ARIMA modeling of the time series and 2) specification of generalized linear models to find the environmental and seasonal variables that influence each of the time series studied. Field work was carried out on the island of Barro Colorado in Panama, based on the hypothesis that insect abundance changes over time, and is related to environmental temperature. The analyses found that the abundance of each insect group shows a different trend, with Isoptera LT II going up, Hymenoptera going down and Coleoptera, Hemiptera, Lepidoptera, Formicidae LT, Isoptera LT I, Isoptera and Formicidae remaining the same over time. The change in abundance is associated with the seasonal effect present in six of the seven possible series. In addition, climatic factors were found to influence insect abundance, but mainly temperature. This study suggests that the abundance of insects in tropical areas, and all the essential functions they provide to humans, could change in the future if there is climate change.

Keywords: Ecological Armageddon; ARIMA; Generalized Linear Models.

CAPITULO 1

1. Introducción

1.1. Planteamiento del Problema

La extinción de especies a lo largo de la historia ha sido común, pues en los últimos 350 millones de años solo han sobrevivido el 1 % de las especies que han habitado alguna vez este planeta (Barnosky et al., 2011). Sin embargo, los mismos autores explican que la extinción se equilibra con la especiación, definido como el proceso por el cual nuevas especies nacen o evolucionan a partir de un ancestro común. La tasa extinción-especiación, a lo largo de la historia, ha tenido cinco alteraciones calificadas como “extinciones masivas” (Vargas, 2013, p.3). La última fue hace 65 millones de años, y en ésta se perdió alrededor del 75 % de las especies que habitaban en el planeta en ese entonces (Ceballos et al., 2015). El planeta no está muy lejos del siguiente evento de extinción masiva, según De Vos et al. (2015) las tasas de extinción actuales son hasta 1.000 veces mayores con respecto a tan solo algunos cientos de años. Por lo tanto, es posible decir que se está en la puerta de la “sexta extinción masiva”, si la tasa actual extinción-especiación persiste, esta sexta extinción masiva podría exceder en dimensión a las cinco anteriores (Payne et al., 2016).

Muchos organismos, desde plantas, pasando por bacterias y animales, están involucrados en actividades esenciales para el hombre, como formar parte del plato de comida en la mesa o encargarse del reciclaje de los desechos que produce el ser humano (Walpole et al., 2009). En esta investigación se estudia a los insectos, el grupo de animales de mayor representatividad ecológica y que supera ampliamente en número al resto de especies que interactúan con el hombre (Mora et al., 2011). Los insectos cumplen muchas funciones importantes en el ecosistema; pero recién se empieza a darle valor económico a algunas de ellas. Por ejemplo, Losey & Vaughan (2006) reportan que, cada año, solo en los Estados Unidos (i) la polinización de productos agrícolas genera 3 mil millones de dólares; (ii) los insectos coprófagos aumentan las tasas de descomposición de residuos orgánicos, generando

380 millones de dólares; (iii) la transmisión de energía de plantas a vertebrados genera 50 mil millones de dólares; y (iv), el control biológico, que genera 4 mil millones de dólares.

En los últimos años, se han generado publicaciones que sugieren la disminución en biomasa o abundancia de insectos en ciertas partes del mundo (Brooks et al., 2012; Colla & Packer, 2008; Crossley et al., 2020; Haye, 2020; Leather, 2018; Thomas, 2005; Wright, 1991). Este declive en la abundancia de insectos todavía no tiene causa confirmada y puede ser un ejemplo de cómo la sexta extinción masiva se empieza a manifestar. Sin embargo, el escenario ha cambiado con respecto a las anteriores extinciones masivas y sus consecuencias pueden ser diferentes, por eso, a este fenómeno se lo ha calificado como un “Armagedón ecológico” (Simon, 2018). En general, existe incomodidad de la comunidad científica y no se puede explicar qué es peor: las pérdidas de insectos ya reportadas o la insuficiencia de datos para poder explicar estas pérdidas (Wagner, 2020). Hasta ahora, la mayoría de los estudios publicados han sido realizados en Europa. Por ejemplo, Crossley et al. (2020) explican que el tomar en cuenta diferentes escenarios, como cambios climáticos o de mayor diversidad, revelará de manera más clara si existe una disminución en la abundancia de insectos a escala global. Estudios en regiones tropicales, que cuentan con poblaciones de insectos abundantes, diversos y poco conocidos son muy raros o inexistentes (Hodge et al., 2019).

Bowie et al. (2019) explican que existe una producción limitada de investigaciones con respecto a la variación temporal de insectos. Cuantificar las tasas de extinción es un proceso complejo, pues las causas cambian con el tiempo, por eso, sería necesario abarcar un periodo de tiempo extenso y tener características específicas por grupos de insectos, hábitats y de diferentes regiones, para así, tener conclusiones más acertadas (Costello, 2015).

Por lo expuesto, y dada la disponibilidad de una base de datos histórica, que abarca el periodo 2009 - 2019, y que contiene datos de abundancia de nueve series de tiempo en cinco órdenes de insectos (taxas)¹ en la Isla de Barro Colorado, en medio del Canal de Panamá, nace la motivación de realizar esta investigación. El objetivo principal de la misma es analizar la dinámica temporal de la abundancia de estos insectos en Panamá. Para esto. Luego de realizar

¹ Agrupación de individuos de una clase que tienen características comunes entre sí (Vargas, 2013).

una descripción básica de las series de tiempo, se procederá con los siguientes análisis: (i) se estimarán modelos SARIMA (metodología Box-Jenkins) para capturar efectos estacionales; y, (ii) gracias a la disponibilidad de datos climáticos se estimarán modelos GLM para verificar la influencia de ciertas variables climatológicas en la abundancia de insectos. El fin último de esta investigación, entonces, es el establecer si las poblaciones de insectos en bosques tropicales están disminuyendo.

1.2. Justificación

Existen varios escenarios, tanto sociales como económicos, que influyen para que exista un cambio ecológico en el estado de las poblaciones de los insectos. Estos pueden ser directos como: el clima, el cambio de uso de la tierra, o indirectos, como el crecimiento de la población humana, emisión de gases de efecto invernadero (Alcamo et al., 2005). Los insectos pueden reaccionar ante factores externos como el clima. De hecho, Lister & Garcia (2018) explican que el efecto del clima es clave para la variación de abundancia de insectos ya que pueden hacer variar algunos de sus ciclos fenológicos. También, Losey & Vaughan (2006) exponen que ciertos factores climáticos tienen efecto en la abundancia de ciertas especies de insectos.

Es así que, algunos autores han reportado cambios en ciertas poblaciones de insectos. Por ejemplo, Sorg et al. (2013) reportan reducciones en la biomasa de insectos en Alemania. Sin embargo, este estudio no tuvo mucha repercusión científica (Storkey et al., 2016). Pero esto cambió cuando Hallmann et al. (2017) reportaron más disminuciones en la biomasa de insectos en Alemania, aunque las causas fueron muy poco descritas en su estudio, fue un gran punto de partida, ya que atrajeron a más investigadores para estudiar el tema (Leather, 2018). Saunders (2017) critica los estudios alemanes explicando que no son representativos a nivel mundial y aduce que son realizados en espacios interrumpidos de tiempo. Bolam et al. (2020) expresan que no se puede verificar la situación real por la calidad de los datos y explica que este es el principal fundamento por el cual no se pueden dar causas claras y precisas.

Varios estudios han encontrado un decrecimiento en la abundancia de varios taxas. Por ejemplo, en el Reino Unido se han evidenciado decrecimientos en carábidos benéficos

(Brooks et al., 2012), en mariposas y polillas (Thomas, 2005) o en libélulas (Clausnitzer et al., 2009). Por eso, es necesario tener evidencia más completa, ya que, estos estudios han sido descriptivos (Wagner, 2020) debido a la falta de datos temporales. Sin ese tipo de datos es muy difícil determinar si existe un decrecimiento y, en caso de existir, poder encontrar las causas, porque los resultados pueden ser engañosos (Saunders, 2017).

Por otra parte, Bowie et al. (2019) explican la importancia de hacer un análisis por familias y no órdenes, ya que se puede analizar de manera comparativa características entre familias del mismo orden. Según los autores, a esta escala taxonómica los resultados son pertinentes y de mayor riqueza ya que se puede capturar la reacción de los diferentes grupos de insectos ante el mismo escenario (climáticos, geográficos, etc.) y, por lo tanto, generar respuestas más completas.

De la misma forma, existen efectos estacionales que pueden influir en la abundancia de insectos y que pueden dar señales confusas o equivocadas como crecimiento o decrecimiento repentino de la abundancia de insectos en ciertos pasajes de tiempo, estos cambios pueden ser modificaciones de temperatura, humedad, entre otras (Lister & Garcia, 2018a). Sin embargo, estudios bien detallados y con muestras temporales importantes comienzan a aparecer. El estudio de Stemkovski et al. (2020) es pionero en exponer relaciones temporales señalando disminuciones en abundancia y diversidad en el territorio de ciertos grupos de artrópodos, además, algunas de sus variables de clima resultan ser significativas. Al tener tanto efectos de las recolecciones pasadas como la influencia de aspectos estacionales se plantea el modelo autorregresivo integrado de media móvil estacional (SARIMA) (Farsi et al., 2021).

La diferenciación estacional plantea diferentes escenarios que pueden ser explicados por otros factores. Por ejemplo, la reacción de los insectos ante cambios climáticos externos (Murphy et al., 2020). De hecho, Sánchez-Reyes et al. (2016) explican la importancia de las variables climáticas en la abundancia de ciertos grupos de insectos. Y, dada la base de datos extensa y estandarizada de una localidad tropical en diferentes grupos de insectos y al tener datos de conteo la mejor opción es la regresión Poisson de los Modelos Lineales Generalizados (GLM) (Nelder & Wedderburn, 1972).

En la economía se estudian los fenómenos que impactan el mundo real y dentro de estos se encuentra la agricultura, la cual desempeña un papel crucial para la vida ya que es la base productiva de muchos de los alimentos de primera necesidad (Swaay et al., 2012). Uno de los factores importantes para el desarrollo de la agricultura es el efecto que tienen los insectos, los cuales realizan labores tales como; polinización, limpieza de campos, descomposición de materia orgánica y actúan en el control biológico de plagas (Losey & Vaughan, 2006).

Según Salazar-Buenaño & Donoso (2019) la agricultura constituye el 5 % de la economía mundial y representa uno de cada tres puestos de trabajo, de existir un decrecimiento de insectos, quizá la humanidad no desaparezca, pero la economía mundial decaería debido al impacto que esta generaría.

Una forma de ver las consecuencias económicas de la eliminación de un servicio brindado por los insectos fue la proporcionada por Southwick & Southwick Jr. (1992), cuyo estudio incluyó la polinización de los cultivos por las abejas melíferas determinando que la pérdida de este servicio tendría repercusiones importantes en la producción de ciertos cultivos y con lo cual el precio al consumidor subiría mucho. De hecho, para ciertos autores como Saunders (2017) es necesario un estudio a largo plazo para llegar a oídos gubernamentales antes que la pérdida sea irreparable, y así, promover estrategias que fomenten la vida silvestre.

1.3. Objetivo General

Modelar la abundancia en poblaciones de insectos para encontrar posibles causas de su dinámica temporal.

1.4. Objetivos Específicos

- Identificar el impacto de las estaciones en la abundancia de insectos.
- Demostrar si hay factores externos (temperatura y humedad) que influyen en la abundancia de insectos a lo largo del tiempo.

Capítulo 2

2. Marco Teórico

2.1. Los insectos en la economía

Los insectos cumplen con múltiples tareas que, según Hill (1997), tienen una influencia económica importante y se manifiesta a través de canales directos e indirectos. A los canales directos pertenecen actividades en las que los insectos son usados para la elaboración de productos tales como: miel, cera, laca o seda. También se incluyen en esta área a los insectos como vectores de enfermedades como la malaria y el paludismo (Hotez, 2007). Al segundo canal de influencia pertenecen actividades como, por ejemplo: (i) la polinización que ayuda a la agricultura en la reproducción de especies, (ii) la descomposición de cadáveres, (iii) alimentación tanto de humanos como animales o (iv) actividades relacionadas con el control biológico. Losey & Vaughan (2006) calcularon el valor monetario de las labores que ejecutan los insectos, estableciendo que generan 57 mil millones de dólares anuales en Estados Unidos. De esta forma, se puede evidenciar de forma más clara y concreta la importancia económica de los insectos.

Entre las funciones más importantes de los insectos está la polinización, en la cual, los insectos influyen en el 75 % de los cultivos a nivel mundial, por eso, la disminución mundial de insectos podría repercutir de manera directa a los seres humanos en forma de una crisis alimentaria (Añino et al., 2020). Se sabe que, aproximadamente el 60 % de suministros alimenticios utilizados a nivel mundial son arroz, trigo y maíz; pero además, otras 20 mil plantas son utilizadas por el ser humano para su alimentación, por eso, se requiere estudiar todo el entorno y basta con enfocarse en un solo sector (O. Wilson, 1988).

Se debe tomar en cuenta que los insectos proveedores más importantes de ciertos servicios, como polinización o descomposición, pueden ser los primeros en perderse porque son mucho más sensibles ante variaciones climáticas o de hábitat, lo que daría lugar a una temprana y

drástica pérdida del servicio, de hecho, la abundancia de insectos puede depender de diversos factores, como un deterioro en su entorno o cambios climáticos (Larsen & Forsyth, 2005).

2.2. Factores que explican la abundancia de insectos

En la siguiente sección se describen los enfoques que explican la dinámica de abundancia² de insectos según su variabilidad, como son: taxonómico, estacional, geográfico y de disturbación; cabe mencionar, que dichos enfoques están relacionados, pero se los diferencia para hacer notar ciertas características particulares.

2.2.1. Enfoque taxonómico

La entomología es la ciencia que estudia las características y funciones en un ecosistema de los insectos para poder diferenciarlos y agruparlos (Chauvin, 1968). Además de sus características anatómicas, la entomología toma en cuenta características como la alimentación, en la cual, existe gran diferencia entre grupos (parasitoides, chupadores de sangre, alimentados con hojas, néctar, polen, frutos, etc.) y esto puede marcar sus comportamientos al salir a buscar su alimento (Arroyo & Viñuela, 1991). Cada una de las especies del reino animal tiene características singulares que determinan su comportamiento (Lamarre et al., 2020). Se presenta los órdenes del reino animal que se toman en cuenta en este estudio con una descripción de sus características:

Coleoptera. Orden con más especies en todo el reino animal con más de 370 mil especies que tienen gran diversidad morfológica y ocupan casi todos los hábitats, a este orden pertenecen los escarabajos, mariquitas, luciérnagas, gorgojos, entre otros (Lawrence & Britton, 1994). Este grupo ha sido muy estudiado con el objetivo de descifrar las claves de su éxito evolutivo y su gran diversidad (Briggs, 2017). Según Duarte & Zenner (2009) la temperatura juega un papel fundamental en el desarrollo de los coleópteros, el desarrollo puede verse afectado ante la presencia de temperaturas muy bajas. También, Morón & Terrón

² Frecuencia con que una especie aparece en la muestra (Wright, 1991).

(1984) explican que la temperatura y precipitaciones modifican tanto la abundancia y la biomasa de los coleópteros.

Hymenoptera. Tercer grupo con más especies del reino animal, con más de 132 familias descritas. Se pueden encontrar especies parasitarias y de vida libre, además, destacan los individuos sociales agrupados en colonias (por ejemplo, hormigas). Este grupo está conformado por: hormigas, abejas, abejorros, avispas, entre otras (Arnett Jr., 2000). Este orden es muy diverso y se lo puede encontrar en regiones árticas, tropicales, desérticas o húmedas (Verdú & Galante, 2009).

Lepidoptera. Mejor conocidos como mariposas. Segundo orden con más especies en el reino animal con 127 familias descritas, además, es el orden con más especies consideradas de importancia económica (Zhang & Hewitt, 1997). Aunque las más conocidas son las diurnas, existen más especies nocturnas (Scoble, 1995). Más del 30 % de las especies descritas se encuentran en la región neotropical, además, son indicadores de la calidad del ecosistema y del cambio climático (Swaay et al., 2012).

Hemiptera. Se caracterizan por alimentarse succionando savia o fluidos animales y comprenden más de 50 mil especies. Entre los más conocidos están los pulgones, cigarras o chinches. Tienen alas y cabeza muy pequeña en comparación al resto del cuerpo que ayudan a su alimentación (Martin & Webb, 1999). Según Vásquez (2011) el aumento de temperatura en estos insectos favorece a su tasa reproductiva.

Isoptera. Conocidos como termitas o polillas. Son de climas tropicales, conocidas también como hormigas blancas por su parecido a las hormigas, pero difieren en muchas características como la alimentación, ya que, comen celulosa presente en la madera (Arnett Jr., 2000). Viven en colonias que pueden llegar a tener hasta tres millones de individuos (Howard & Thorne, 2010). Han sido objeto de estudio por ser una especie primitiva y que ha podido acoplarse a los diversos cambios a lo largo del tiempo (Wappler et al., 2012).

2.2.2. Enfoque climático

Según Gullan (2014) este enfoque tiene que ver con las características o relaciones climatológicas y su influencia en la abundancia de insectos, además el autor explica que, las características climatológicas tienen influencia directa en los procesos y rutinas llevadas a cabo por los insectos.

Losey & Vaughan (2006) reportan que los diversos factores climáticos tienen efecto determinante en la abundancia de muchas especies ya que pueden llegar a cambiar sus ciclos fenológicos. Según los autores, los cambios se dan por escenarios extremos, pero también explican que los pequeños cambios continuos modifican los ciclos fenológicos de a poco, lo cual, puede alterar la abundancia de insectos progresivamente.

Adicionalmente, Lister & Garcia (2018a) explican en su estudio de Puerto Rico que las variables climatológicas son el principal impulsor de los cambios de abundancia en artrópodos y que las temperaturas extremas influyen de manera negativa en la abundancia. De hecho, Schowalter et al. (2021) explican que los artrópodos en Puerto Rico cambian su abundancia con el tiempo, debido únicamente a perturbaciones climatológicas extremas.

Según Bryans et al. (2009) si siguen estas tendencias a la baja, vivir en el mundo cada vez se complica más; el paraíso que se conoce va desapareciendo a gran velocidad y siendo un ámbito importante a tomar en cuenta para la sobrevivencia humana. Según el autor, los estudios que corroboran estos decrecimientos son abundantes, además, explica que la degradación del ambiente se manifiesta de diferentes formas como la escasez del agua, contaminación de los océanos o la extinción de los animales o plantas. Para Smithson (2002), las manifestaciones del cambio climático son el aumento de temperatura, la tendencia lineal a cien años (1906-2005), que reporta un aumento por decenio de 0.7 grados. Entre 1956 y 2005, el cambio de temperatura en tendencia lineal ha sido de 0.13 grados por decenio, es decir, casi el doble del experimentado en los cien años transcurridos desde 1906 hasta 2005.

2.2.3. Enfoque estacional

Las estaciones son ciclos naturales que se generan por el movimiento de traslación del planeta alrededor del sol (Garcia, 2000). Entre las estaciones existen cambios de ciertas

variables del clima, además, estas son muy marcadas y los cambios en variables como temperatura del aire o precipitaciones resultan en cambios en el paisaje, los cuales, manejan ciclos de alimentación o exploración de muchas especies (Gattinoni et al., 2011). Los insectos son muy sensibles a los cambios climáticos, pues diferencia de los humanos que tienen una temperatura constante, los insectos se adaptan a la temperatura del ambiente (Fernandez, 2019).

Además, las estaciones no son las mismas en todas las regiones del planeta, dependen de su ubicación y se pueden diferenciar regiones templadas y trópicos (Koppen, 1900). Las regiones templadas se caracterizan por temperaturas medias anuales entre 12 y 18 grados centígrados, además, cuentan con cuatro estaciones bien marcadas: un verano caliente, un otoño con temperaturas a la baja, un invierno frío y una primavera con temperaturas al alza (Gil & Olcina, 2017). En los trópicos la temperatura no se ve alterada a lo largo del año, solo se diferencia por las precipitaciones entre estación húmeda y estación seca (Oliver, 2015).

Se debe considerar que las estaciones delimitan los ciclos de alimentación de los insectos, por ejemplo, ciertos insectos guardan energía para alimentarse mientras no hay polen, esperando que las flores vuelvan a aparecer, si existe una sequía las poblaciones de insectos no podrán sobrevivir al verano como lo hacían antes (Crossley et al., 2020). De hecho, Schowalter et al. (2021) mencionan que la abundancia de insectos no está declinando, solo reaccionan a los cambios climáticos y por su sensibilidad se ven afectados disminuyendo su abundancia. Según Sánchez-Reyes et al. (2016) el comportamiento de los insectos entre estaciones es cambiante y depende mucho de su taxonomía, algunos insectos pueden salir más en épocas lluviosas al tener mayor alimentación u otros pueden salir más en verano. Así, Murphy et al. (2020) reportan que en las estaciones húmedas la abundancia de algunos grupos de insectos sube y explican que se da por la influencia directa en variables como temperatura, humedad o precipitaciones.

2.2.4. Enfoque geográfico

Según Hodge et al. (2019), el ampliar el estudio a diferentes territorios es necesario ya que este cambio puede modificar múltiples condiciones, especies, diversidad, etc. Por ejemplo,

Haye (2020) reporta en Zackenberg disminuciones en la abundancia de artrópodos, pero, además, cuando se da un cambio de escenario de prados a pantanos húmedos la abundancia de insectos aumenta. De la misma forma, Chao et al. (2020) explican la importancia de ampliar los estudios, pero ya reportan que las tendencias decrecientes se mantienen.

Los cambios geográficos pueden darse a diferentes escalas, pues lo expuesto por Koppen (1900) la clasificación climática-geográfica a nivel mundial se puede resumir en cinco grupos: tropical, seco, templado, continental y polar. Según el autor, en esta clasificación cambian el clima en general y el número de estaciones y su composición. Otra clasificación inferior, propuesta por Koppen (1900), corresponde a los subtipos determinados por ciertas variables climáticas, pero manteniendo las características de su grupo principal. A esta división pertenecen, por ejemplo, climas subtropicales, árido, semiárido, de tundra, gélidos, etc. Según Critchfield (1983) pueden darse cambios grandes determinados por variables como altura o humedad, pero las características principales no se verán alteradas y deberían seguir con el mismo comportamiento.

En general, la dinámica de abundancia de insectos ha sido estudiada en su mayoría para países europeos y Estados Unidos (Brooks et al., 2012; Colla & Packer, 2008; Crossley et al., 2020; Hallmann et al., 2017; Haye, 2020; Thomas, 2005; Wright, 1991). Hallmann et al. (2017) explican que existen resultados previos para ciertos países, pero mencionan que es necesario ampliar este análisis ya que los efectos en regiones más húmedas, como América Latina y Caribe, pueden dar más luces al ser regiones con mayor diversidad. Un punto de partida es Lister y García (2018) que reportan la reducción de abundancia en artrópodos y la biomasa ha disminuido por lo menos 10 veces en Puerto Rico, también mencionan que el calentamiento climático es la principal fuerza impulsora de estas disminuciones.

2.2.5. Enfoque de disturbación (el rol del ser humano)

Según Byers et al. (2002) el nivel de intervención es el cambio realizado por los humanos en el hábitat de ciertas especies, llegando a modificar características individuales de cada especie ejerciendo presión en ellas y sus hábitats. Según Sanchez-Bayo & Wyckhuy (2019) existen varias causas para la pérdida de insectos que tienen que ver con los seres humanos, por ejemplo directa como: urbanización, agricultura intensiva, contaminación, pesticidas,

fertilizantes sintéticos. Por ejemplo, Baxter-Gilbert et al. (2015) reportan que las colisiones de insectos con vehículos dan pérdidas de cientos de miles de insectos en un año en 2 km de recorrido en Canadá. De hecho, los autores explican que cada población de especie tiene sus requerimientos con respecto a la extensión o características del terreno óptimas para ciertos procesos a cumplir.

A continuación, se presenta un resumen de los enfoques explicados, mostrando su característica en relación a la dinámica de insectos.

Tabla 2.1. Resumen de los determinantes de la dinámica de insectos

Determinantes de la dinámica de insectos	Característica clave para el estudio	Ejemplos	Inclusión en el estudio
Enfoque Taxonómico	Modificación de comportamiento y abundancia según la especie.	Coleoptera Isoptera Hemiptera Hymenoptera Lepidoptera	Si
Enfoque climático	Cambio en rutinas llevadas a cabo por los insectos.	Templado Seco Tropical	Si
Enfoque estacional	Cambios en los ciclos fenológicos.	Húmeda Seca	Si
Enfoque geográfico	Cambios en el ecosistema.	América África Europa	No
Enfoque de disturbación	Modifica el hábitat de las especies cambiando su comportamiento.	No intervenido Intervenido	No

Elaboración: Autor

2.3. Declinación de insectos en el mundo

A pesar de la gran importancia económica de los insectos, investigaciones recientes alertan sobre una probable disminución a nivel global en la abundancia de los insectos (Crossley et al., 2020; Hallmann et al., 2017) y el tema ha atraído la atención de especialistas de diversas áreas que ya han cuantificado esta pérdida. Por ejemplo, Hallmann et al. (2017) estiman que, en Alemania, se presenta una disminución del 75 % de la biomasa de insectos. A su vez, Sánchez-Bayo & Wyckhuys (2019) predicen una extinción del 40 % de todas las especies en pocas décadas y, según sus pronósticos, en los ecosistemas terrestres, los lepidópteros, himenópteros y ciertos coleópteros parecen ser los taxones más afectados. Aunque este tema suele llamar la atención de biólogos y zoólogos (Bowie et al., 2019); existe en la actualidad una discusión política (Losey & Vaughan, 2006) y social (Pimentel et al., 1997) que contribuyen a mejorar el entendimiento y su real importancia en el bienestar del ser humano (Lamarre et al., 2020). A pesar de que los estudios que analizan el decrecimiento de insectos son todavía limitados, existen descripciones consideradas como “alarmantes” (Salazar-Buenaño & Donoso, 2019, p. 1). Por ejemplo, algunos investigadores lo categorizan como: "un fenómeno apocalíptico"; este tipo de referencias contribuyen a que el interés de algunos investigadores se incremente (Briggs, 2017).

A continuación, se presenta una tabla resumen de los principales trabajos empíricos.

Tabla 2.2. Resumen de los hallazgos previos reportados por la evidencia empírica

Estudio	Reporte	Variable de estudio	Especie	Ecosistema	Causa
Sanchez-Bayoa & Wyckhuy (2019)	Disminución	Número de especies	Coleoptera	Templado	Clima
Wilson & Maclean (2010)	Disminución	Abundancia	Lepidoptera	Templado	Clima
Mineau y Whiteside (2013)	Disminución	Abundancia	Insectos	Templado	Mano humana

Schowalter et al. (2021)	No disminución	Abundancia	Coleoptera	Tropical	Clima
(Checa et al., 2013)	Disminución	Número de especies	Lepidoptera	Tropical	Clima
(Pinheiro et al., 2002)	No disminución	Abundancia	Lepidoptera	Tropical	Estacional

Elaboración: Autor

2.4. Hipótesis

La abundancia de insectos cambia en el tiempo, en relación a la temperatura en la Isla de Barro Colorado.

Capítulo 3

3. Datos y metodología

En esta sección se procede a describir la base de datos. Luego, se realiza un análisis descriptivo de las variables involucradas, para luego, describir la metodología a usar.

3.1. Descripción del lugar

Barro Colorado es una isla formada en 1914 en consecuencia de la construcción del canal de Panamá, el clima de la isla es típico de un bosque tropical de tierras bajas, se extiende sobre un área de 1500 ha y 137 metros de altura sobre el Lago Gatún, esta isla es un sitio protegido dedicado al estudio de bosques tropicales administrado por el Instituto Smithsonian y ha permanecido relativamente inalterado durante al menos 100 años (Smithsonian Tropical Reserch Institute, 2020). Tiene una temperatura promedio de 27 ° C, presenta dos estaciones marcadas: la temporada húmeda se extiende desde mayo a diciembre y la estación seca desde diciembre hasta abril (Sugasti & Pinzón, 2020).

En la Figura 3.1 se presenta el mapa de la isla de Barro Colorado, además, se presentan los 11 lugares de recolección de insectos.

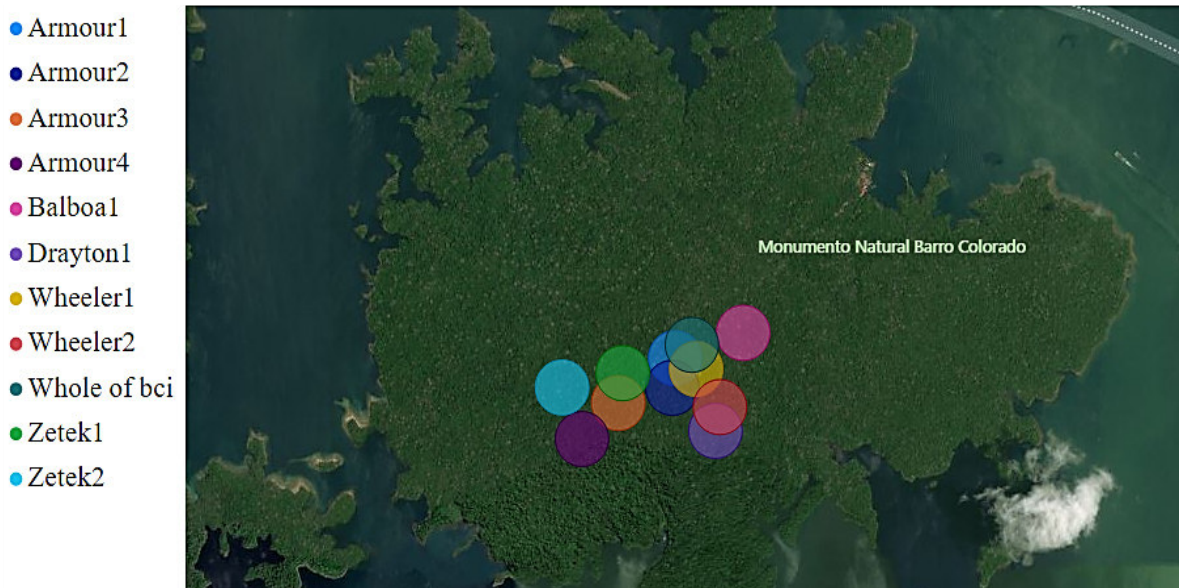


Figura 3.1. Mapa Barro Colorado y lugares de recolección.

Elaboración: Autor.

3.2. Base de datos

La base de datos contiene información referente a la abundancia de insectos así como al comportamiento climático. Con respecto a la abundancia de insectos, se realizaron cuatro recolecciones al año para siete series (Coleoptera, Hemiptera, Lepidoptera, Formicidae LT, Isoptera LT I, Isoptera LT II) y una recolección para dos series (Formicidae e Isoptera). Las recolecciones pueden durar entre uno y tres días. Además, los datos climáticos son el promedio del mes en el cual se realizó la recolección de cada serie. A continuación, se procede a explicar de forma detallada la base de datos.

3.2.1. Datos (Abundancia de insectos)

La abundancia se define como el número de individuos encontrados en una muestra (Preston, 1948). Las muestras de insectos fueron recolectadas durante el periodo 2009-2019, agrupándolas en nueve grupos diferentes taxonómicamente, esto, debido a lo explicado por Bowie et al. (2019) quienes argumentan que existen diferencias marcadas en las características de cada familia. La Tabla 3.1 permite observar las nueve series resumiendo las familias que agrupa cada una y el número de colecciones realizadas al año.

Tabla 3.3. Composición de las series

Serie	Familias agrupadas	# recolecciones al año
Coleoptera	Curculionidae, Passalidae, Scarabaeidae	A, B, C, D ^{Nota1}
Hemiptera	Flatidae, Reduviidae	A, B, C, D
Lepidoptera	Arctiidae, Crambidae, Elachistida, Geometridae, Hedyllidae, Hesperidae, Lycaenidae, Lymantriidae, Megalopygidae, Noctuidae, Notodontidae, Nymphalidae, Oecophoridae, Papilionidae, Pieridae, Pyralidae, Riodinidae, Paturniidae, Sphingidae, Uraniidae	A, B, C, D
Hymenoptera	Apidae, Halictidae	A, B, C, D
Formicidae	Formicidae	B ^{Nota2}
Formicidae LT	Formicidae LT	A, B, C, D
Isoptera	Rhinotermitidae, Termitidae	B ^{Nota2}
Isoptera LT I	Kalotermitidae LT I	A, B, C, D
Isoptera LT II	Termitidae LT II, Rhinotermitidae LT II	A, B, C, D

^{Nota 1} Para encontrar las fechas de las recolecciones ver Tabla 3.2

^{Nota2} En el caso de Formicidae e Isoptera, se recolectaron solamente una vez por año, en junio. Ver Tabla 3.2

Elaboración: Autor

En algunos de los métodos de recolección se tomaron varias réplicas, en estos casos, se tomó el promedio. Para las series en las cuales se realizó más de una recolección su distribución se describe en la Tabla 3.2.

Tabla 3.4. Descripción de las recolecciones

Recolección	Meses	Descripción
A	Febrero-Marzo	Pico de la temporada seca.
B	Abril-Mayo	Cambio de temporada seca a temporada húmeda. En el caso de Formicidae e Isoptera se colectaron en Junio.
C	Septiembre- Octubre	Pico de la temporada húmeda.
D	Noviembre- Diciembre	Cambio de temporada húmeda a temporada seca.

Fuente: Instituto Smithsonian. Elaboración: Autor

Los métodos de recolección son descritos en la Tabla 3.3, algunos son para un tipo específico de especies, pero otros como Trampas de luz son los más comunes y atrapan diversas especies.

Tabla 3.5. Métodos de recolección

Método	Descripción
Transect	Se recolectan mariposas con red durante 30 minutos.
Trampa Mcphail	Utiliza feromonas que atraen y atrapan al insecto en un embudo (Burditt, 1982).
Trampa de luz	Los insectos son atraídos por una fuente de luz y capturados en un recipiente que se encuentra en la parte inferior (Castresana et al., 2008).
Termitidae Qt.	Se colecta en 40 cuadrantes durante 30 minutos.
Winkler	Los insectos caen al embudo atraídos por la hojarasca y son deshidratados hasta caer en un recipiente con alcohol (Fernández, 2003).

Elaboración: Autor

3.2.2. Variables Climáticas

Los datos fueron descargados de la página del Programa de Monitorización Física del Instituto Smithsonian en la estación de monitoreo El Claro. Los datos son recolectados tanto manera manual como con instrumentos eléctricos, teniendo mejores resultados con mediciones manuales a largo plazo, por lo cual, se usarán los datos recolectados de manera manual (Smithsonian Tropical Research Institute, 2020). En la Tabla 3.4 se presentan las variables climáticas a utilizar con su frecuencia de recolección y unidad de medida. Se tomaron cinco variables que caracterizan la temperatura y humedad del sitio de estudio en el tiempo.

Tabla 3.6. Unidades de medida de las variables climáticas

	Parámetros	Frecuencia	Unidad
Temperatura	Temperatura Máxima	diaria	Celcius
	Temperatura Mínima	diaria	Celcius
Humedad	Lluvia	diaria	mm
	Evapotranspiración	diaria	cm
	Humedad relativa	diaria	%

Elaboración: Programa de Monitorización Física-Instituto Smithsoniano

Para todas las variables climáticas la frecuencia es diaria, por lo cual, se obtuvo el promedio en el mes que se dio la recolección de insectos. Según el informe meteorológico del Instituto Smithsoniano en Barro Colorado la humedad presenta diferencias marcadas entre las dos estaciones del año, pero la temperatura tiene una variación relativamente pequeña durante el año.

3.2.3. Variables estacionales

Para medir el impacto estacional en la abundancia de insectos se utilizó variables cualitativas referentes a el periodo de recolección. Para las series Coleoptera, Hemiptera, Lepidoptera, Formicidae LT e Isoptera LT II se utilizó cada recolección (A, B, C y D). Para las series

Hymenoptera e Isoptera LT I se diferencia entre recolección en época húmeda o época seca. En todos los casos se toma el valor de 1 en el periodo tomado en cuenta y 0 caso contrario.

3.3. Estadística descriptiva

3.3.1. Variación de la abundancia de insectos

A continuación, se realizará un análisis preliminar utilizando estadística descriptiva. Además, se hace una descripción detallada de cada serie en el Anexo 1, y una descripción detallada de cada variable climática en el Anexo 2.

En la Figura 3.2 se muestra la abundancia de insectos para las nueve series de estudio. Además, se incluye en cada serie la Línea de Promedio.

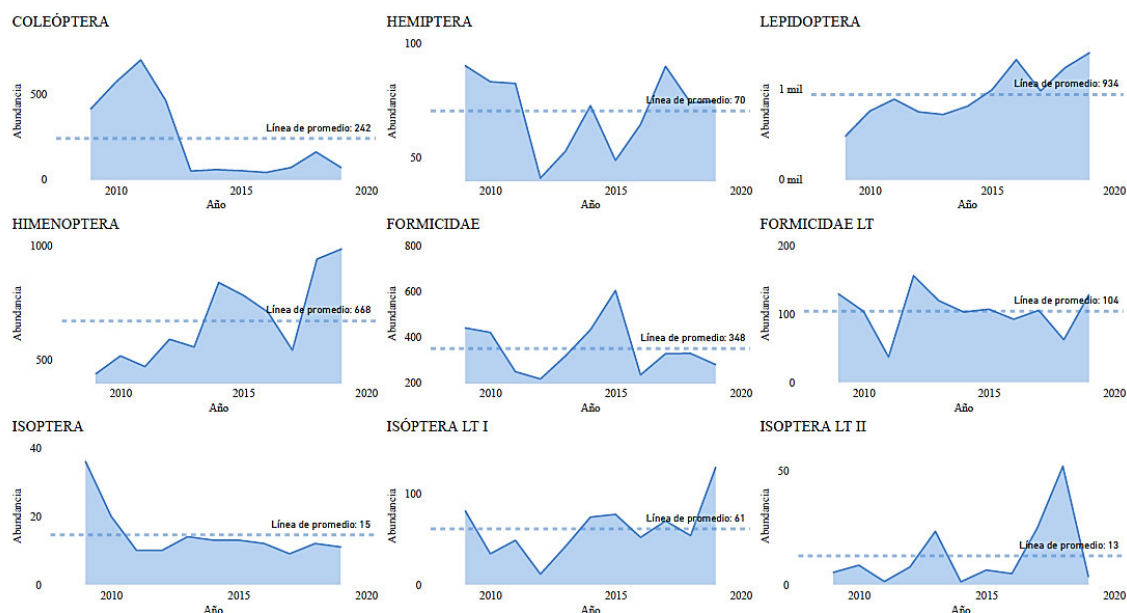


Figura 3.2. Abundancia de insectos periodo 2009-2019 en Barro Colorado.

Se incluyen las líneas de promedio.

Elaboración: Autor.

Como se observa, la abundancia presenta cambios para todos los grupos de insectos en los años de estudio. Lepidoptera es el grupo con mayor promedio de abundancia anual, o sea 934

insectos. Los coleópteros ocupan el tercer lugar del promedio anual de recolecciones superado por Lepidoptera e Hymenoptera.

Además, mediante la inspección gráfica se muestra que Coleoptera e Isoptera tuvieron un decrecimiento importante para luego mantenerse constante hasta el final del periodo estudiado. Por otra parte, la abundancia de Lepidoptera e Hymenoptera ha ido creciendo progresivamente.

También, es importante destacar que la abundancia Hemiptera presenta dos caídas importantes en los años de 2012 y 2015, en los cuales alcanzó una abundancia de alrededor de 40 insectos. En contraste, el promedio en los otros años de estudio estuvo por encima de 80 insectos anuales. De la misma forma, Formicidae LT tuvo un mínimo importante en 2011, en el cual, se recolectaron 37 hormigas, pero el promedio de las recolecciones restantes fue alrededor de 100 hormigas por año.

En contraste, Formicidae e Isoptera LT II han tenido picos altos, las hormigas tuvieron un despunte en 2015, registrando 602 insectos recolectados. También, la serie Isoptera LT II tuvo un repunte en 2013 con 23, su máximo en 2018 con 52 insectos.

Según lo descrito algunas series han tenido cambios importantes en los años de estudio, pero para responder a la pregunta principal: ¿están decreciendo los insectos? se necesita un panorama general del comportamiento de las series. Por ello, en la Figura 3.3 se presenta la tendencia de cada serie.

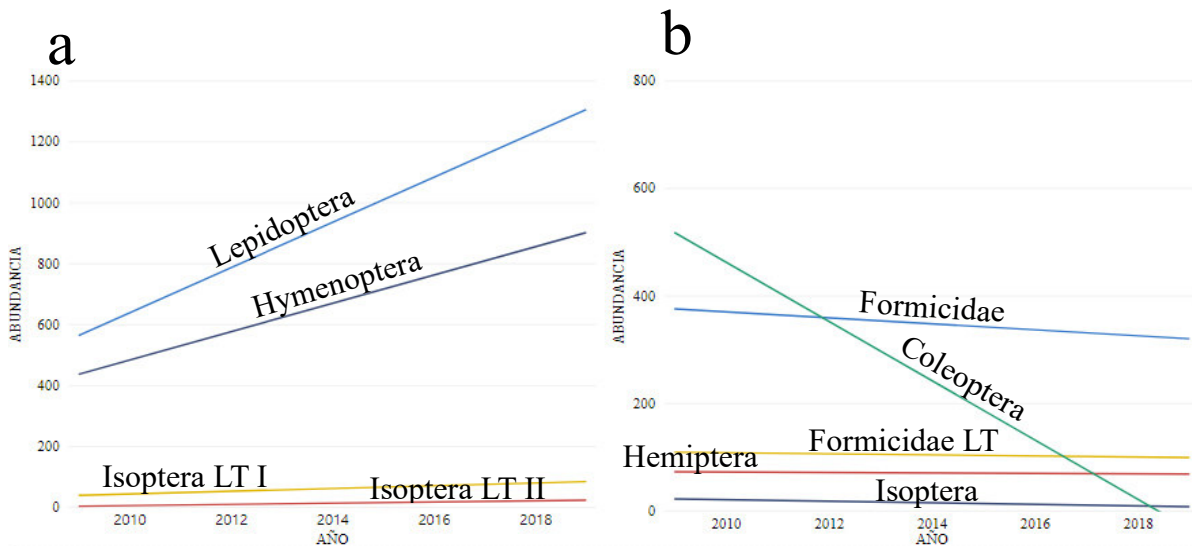


Figura 3.3. Tendencia de la abundancia de insectos periodo 2009-2019.

En (a) se presentan las series que tienen pendiente positiva y en (b) las series con pendiente negativa.

Elaboración: Autor

Al ver estas tendencias hay que destacar que cuatro series (que incluyen Lepidoptera y Hymenoptera) han tenido un aumento en su abundancia con el paso del tiempo al tener una pendiente positiva.

Según lo expuesto en el apartado (b) existen cinco series con una tendencia a la baja, el caso más alarmante es el de Coleoptera en el cual tiene una tendencia a la baja. A continuación, se realiza un análisis más exhaustivo de esta serie para mostrar cual ha sido su comportamiento en la Figura 3.4.

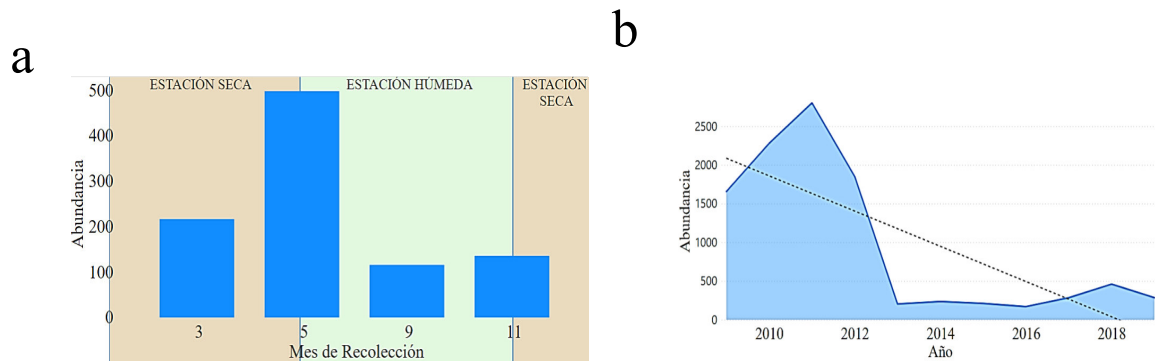


Figura 3.4. Abundancia de Coleoptera en la Isla Barro Colorado.

En (a) se muestra la distribución de la abundancia en cada recolección, en (b) se muestra la distribución anual de la serie con su tendencia.

Elaboración: Autor

En la Figura 3.4 (b) se puede observar la dinámica de abundancia de los coleópteros en el periodo 2009-2019, la cual tuvo su pico en el año 2011 cuando se recolectaron 2 802 insectos, luego decreció estabilizándose en valores menores a 500 insectos.

Con respecto a la diferencia entre estaciones, esta serie aparenta tener un comportamiento estacional, ya que en la estación seca se evidencia mayor abundancia de insectos (recolección de marzo y mayo) con respecto a la estación húmeda como se puede observar en la Figura 3.4 (a).

El análisis estacional puede dar luces del cómo o porqué de la dinámica de insectos. En la Figura 3.5 se presenta los cambios que han existido en el mínimo de abundancia entre recolecciones entre el primer y último año de estudio.

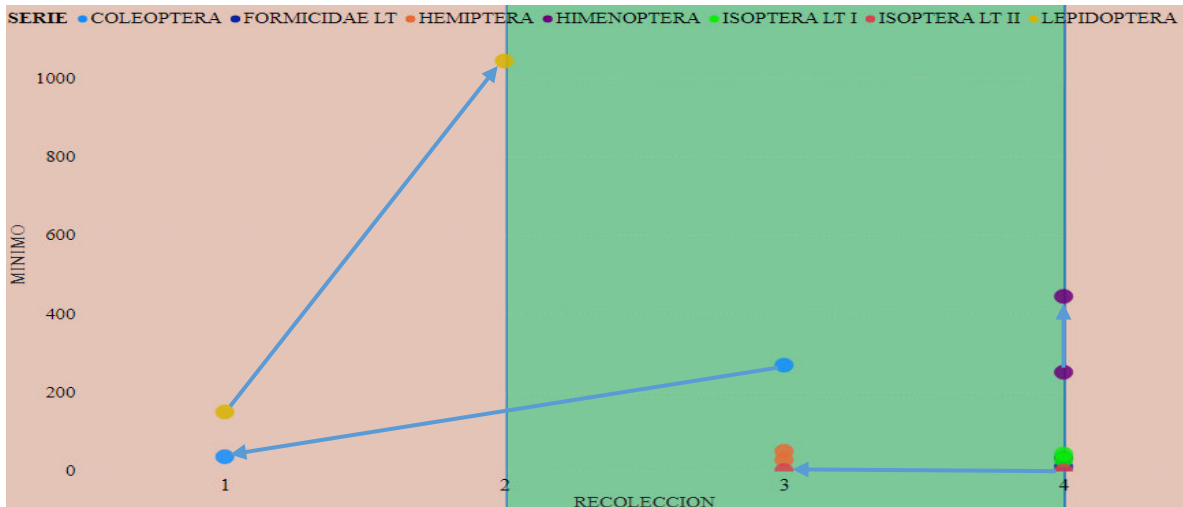


Figura 3.5. Dinámica de los mínimos de abundancia entre recolecciones.

El color marrón representa la estación seca y el verde la estación húmeda. Las recolecciones (A, B, C y D) son representadas por números 1,2,3 y 4. El punto de partida de las flechas representa al año 2009 y el punto de llegada al 2019.

Elaboración: Autor

Hay que destacar que Hymenoptera, Isoptera LT I y Formicidae LT tuvieron su abundancia más baja en el cambio de estación húmeda a seca y tanto Hymenoptera como Isoptera LT I tuvieron una abundancia similar en los dos periodos. Por otra parte, Hemiptera tuvo su pico más bajo de recolección siempre en el pico de la estación húmeda y su magnitud no cambió de manera significativa.

La serie Lepidoptera pasó de tener su mínimo de recolección en la estación seca a tener su mínimo en el cambio de estación seca a húmeda, además, el mínimo aumentó drásticamente pasando de menos de 200 insectos a más de 1 000. También, Hemiptera presenta un cambio en su mínimo de abundancia pasando del cambio de estación húmeda a seca al pico de estación húmeda.

Se observa que los coleópteros en 2009 tuvieron su abundancia más baja en el pico de la estación húmeda y en 2019 su recolección más baja fue en el pico de la estación seca.

De la misma forma, se presentan los cambios que sufrieron los máximos de abundancia entre recolección para verificar si también han sufrido modificaciones.

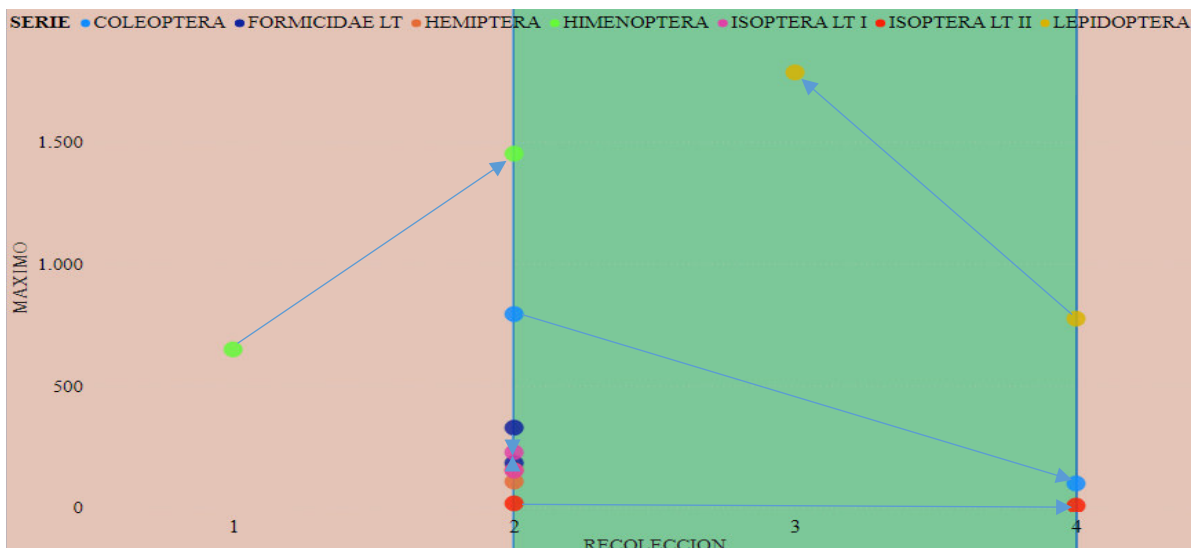


Figura 3.6. Dinámica de los mínimos de abundancia entre recolecciones.

El color marrón representa la estación seca y el verde la estación húmeda. Las recolecciones (A, B, C y D) son representadas por números 1, 2, 3 y 4. El punto de partida de las flechas representa al año 2009 y el punto de llegada al 2019.

Elaboración: Autor

En la Figura 3.6 se evidencia que también existen modificaciones en los máximos recolectados entre 2009 y 2019 para algunas especies, para Hymenoptera y Lepidoptera los cambios fueron de un periodo; los hymenopteros pasaron de tener su máximo de abundancia en 2009 en el pico de estación húmeda en alrededor de 600 insectos a tener el máximo en 2019 en el cambio de estación seca a húmeda con más de 1 400 insectos. También, los lepidópteros aumentaron su máximo de abundancia en el año 2019, con más de 1 700 insectos en el pico de la estación húmeda, en contraste con los menos de 800 recolectados en el cambio de estación húmeda a seca en 2009.

Con respecto a Coleoptera y Hemiptera cambiaron de manera drástica su abundancia pasando de tener su máximo en el cambio de estación húmeda a seca a tenerlo en el cambio de estación seca a húmeda.

Tomando en cuenta lo descrito en los dos últimos gráficos, ¿es normal que existan cambios en el mínimo y máximo de recolección entre el primer y último año? No es normal, ya que, según lo descrito en el Anexo 2 las series climáticas siguen una forma cíclica y un cambio en el máximo o mínimo de abundancia de recolección significaría una desviación de los insectos

en su comportamiento habitual. Schowalter et al. (2021) menciona que, las razones del cambio en el comportamiento de algunas especies pueden estar asociadas al cambio climático, ya que estos cambios pueden modificar los ciclos fenológicos de las especies y causando diferencias en su comportamiento habitual. Por ello, se muestra la relación que existe entre cada serie descrita y las variables climáticas.

3.3.2. Variación de las variables climáticas

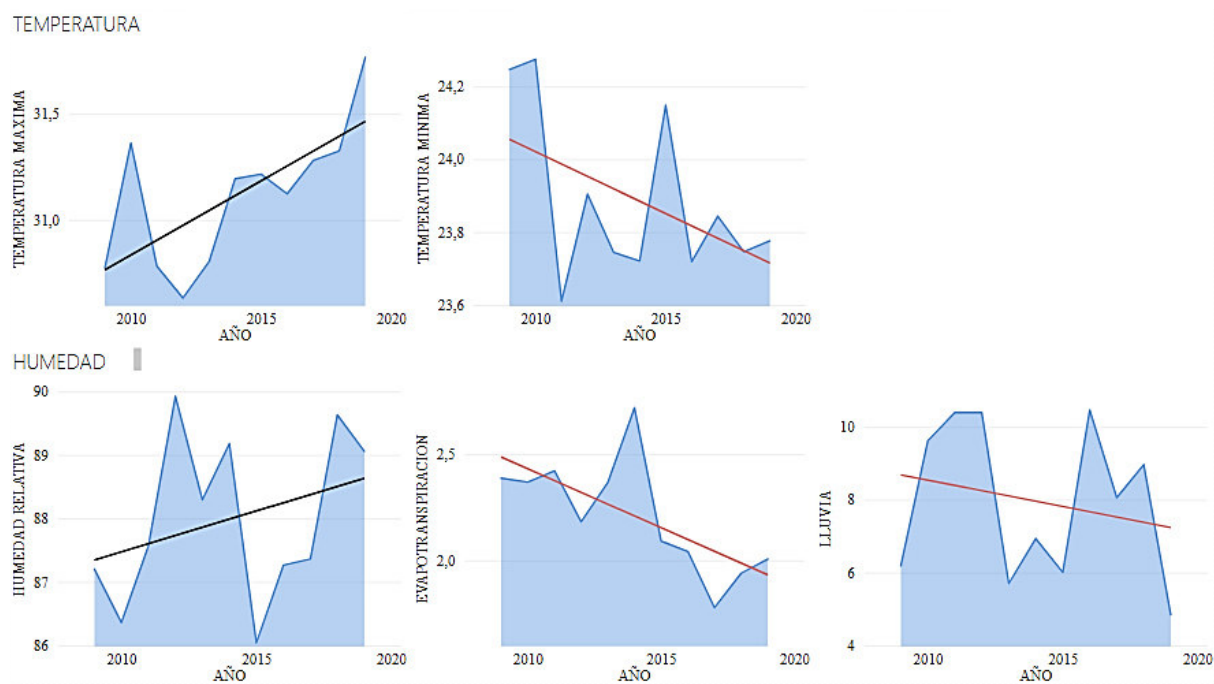


Figura 3.7. Dinámica de las variables climáticas en Barro Colorado.

Se presentan las cinco series climáticas con su línea de tendencia.

Elaboración: Autor.

En la Figura 3.7 se muestra que ha existido diferentes comportamientos de las variables de temperatura y humedad, con temperatura máxima y humedad relativa subiendo y temperatura mínima, evapotranspiración y lluvia bajando. Por ejemplo, se observa un decrecimiento en el nivel de lluvia en Barro Colorado, teniendo sus puntos más bajos del año 2013 al 2015 con valores menores a siete milímetros diarios en promedio. De la misma forma, se reporta que ha decrecido el nivel de evapotranspiración, de manera constante, bajando desde su pico

máximo reportado en el año 2014 en más de 2.7 cm diarios, a menos de 1.8 cm en el año 2017.

La temperatura mínima tiene una tendencia decreciente, lo cual, contradice lo descrito en el capítulo 2. En los dos primeros años los máximos de temperatura fueron mayores a 24.2 grados centígrados, en los dos últimos menores a 23.8, reportando un cambio de más de 0.4 grados en los 11 años de estudio.

Por otra parte, la temperatura máxima ha tenido una tendencia creciente reportando en su primer año menos de 30.8 grados y pasando al último año de estudio a más de 31.7, es decir, un cambio de casi un grado en 11 años. Esto supera en gran medida lo expuesto por Cornish (2004) el cual reporta cambios de 0.17 grados por decenio.

La humedad relativa también reporta un crecimiento, teniendo su pico máximo en 2012 con casi 90 por ciento y su valor más bajo en 2012 con menos del 86.2 %. Cabe mencionar que se puede encontrar un análisis de las variables climáticas en el Anexo 2.

3.3.3. Relación de las variables climáticas con la abundancia de insectos

Una vez presentadas las variables climáticas, se procede a describir el efecto que pueden tener en la abundancia de insectos, para eso, se realiza un análisis de correlaciones. Cabe recalcar que se tuvieron siete series con frecuencia de recolección trimestral y dos series anuales. La correlación permite dar un signo y valor a la relación lineal entre dos o más variables mostrando valores entre -1 y 1. El signo indica la dirección, valores positivos indican una relación directa, valores negativos relaciones inversas y un valor cercano a cero evidencia una relación lineal nula entre las variables. La magnitud indica la fuerza de la relación siendo 1 o -1 una relación perfecta y cero que las variables no están relacionadas (Cohen, 1988).

Dada la variación en el número de recolecciones que se hicieron para los diferentes taxa (una y cuatro colectas anuales) y estacionalidad encontradas en las series con cuatro colecciones al año (seca, cambio de temporada seca a húmeda, húmeda, y cambio de temporada húmeda a seca) se hicieron 3 correlaciones. Es decir, correlación anual de las series trimestrales, correlación estacional de las series trimestrales y correlación anual de las series anuales.

En la Figura 3.8 se presenta la gráfica de correlaciones de los totales anuales de las series que fueron recolectadas cuatro veces al año.

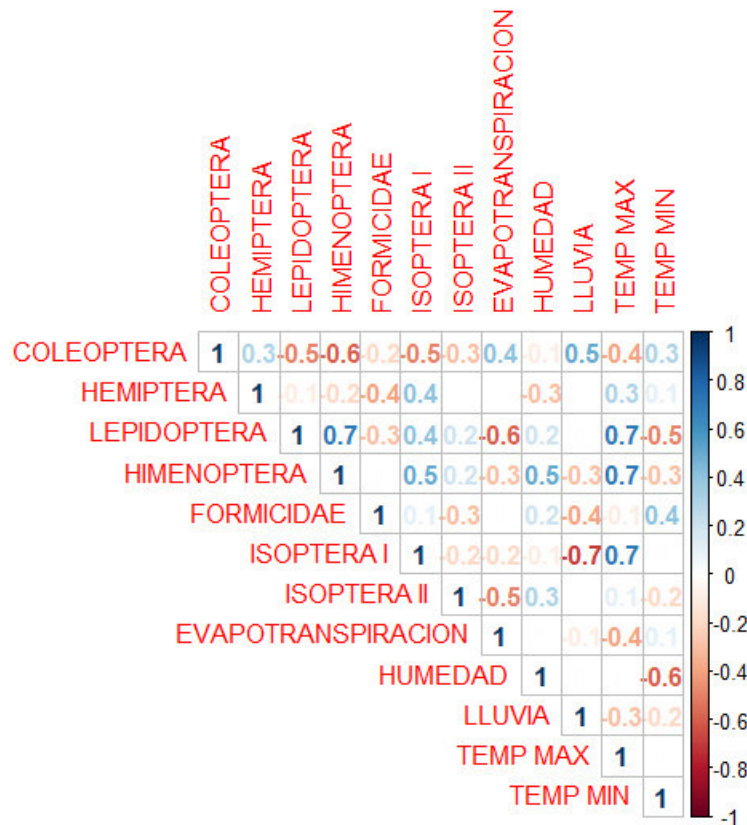


Figura 3.8. Correlaciones anuales de las series con cuatro recolecciones al año

Elaboración: Autor

Cabe destacar que los lepidópteros, himenópteros y los isópteros I tienen una correlación alta con temperatura máxima, es decir, en los años cuando la temperatura máxima en Barro Colorado es más alta se encuentran más de este tipo de insectos. Además, los hemípteros no tienen presencia de relaciones lineales importantes entre año y año, temperatura máxima tiene una magnitud de 0.3 y humedad de -0.3.

La evapotranspiración tiene un efecto negativo en la abundancia de todos los insectos descritos, excepto para los coleópteros que presentan una relación positiva de 0.3. Al contrario, la diferencia de humedad entre años tiene, en general, un efecto positivo con la abundancia de insectos excepto con los hemípteros.

En la Figura 3.9 se presenta un gráfico de correlaciones de las series tomando en cuenta sus valores trimestrales.

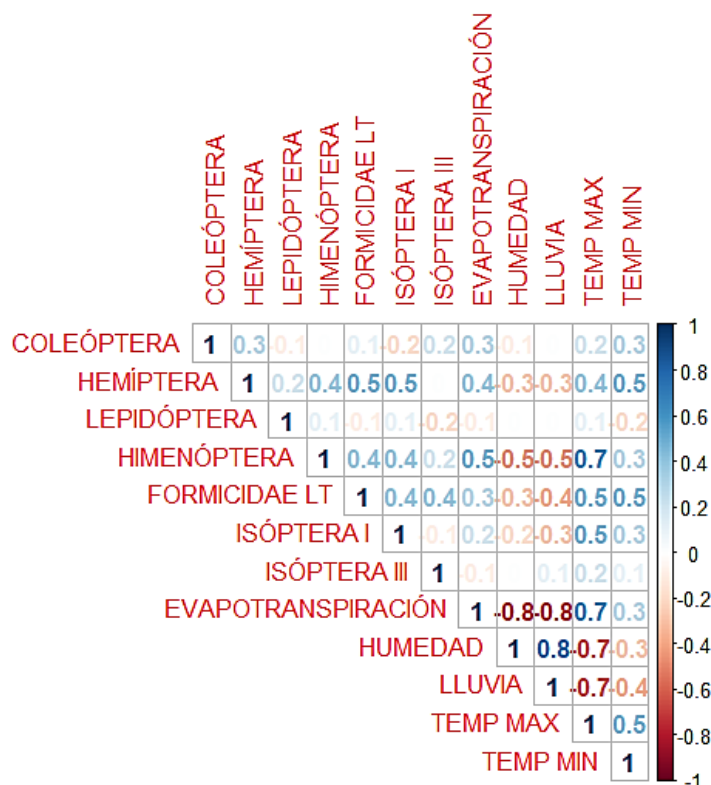


Figura 3.9. Correlaciones estacionales de las series con cuatro recolecciones al año

Elaboración: Autor

En la gráfica se puede observar que hemípteros, himenópteros y las hormigas LT están más correlacionados con las variables climáticas que los otros grupos, todas coinciden en correlaciones positivas con evapotranspiración y temperatura; y negativas con humedad y lluvia. Con respecto a las variables climáticas se encuentran correlaciones más altas, la evapotranspiración y la temperatura tienen correlación positiva entre ellas, pero negativa con lluvia y humedad. Cabe mencionar que el incluir variables explicativas por correlaciones altas puede ser un error³ (Gujarati & Porter, 2007), pero, en este caso, según Gil & Olcina

³ Inclusión de variable irrelevante.

(2017), cada una de las variables climáticas tiene características singulares e importantes a tomar en cuenta en cada caso.

A continuación, se presentan las correlaciones anuales. En la Figura 3.10, se observa que existen correlaciones negativas de los isópteros y hormigas con humedad y positivas con la temperatura. Las precipitaciones tienen un efecto diferente en Isoptera y Formicidae, los isópteros tienen una relación directa y las hormigas tienen una relación inversa.

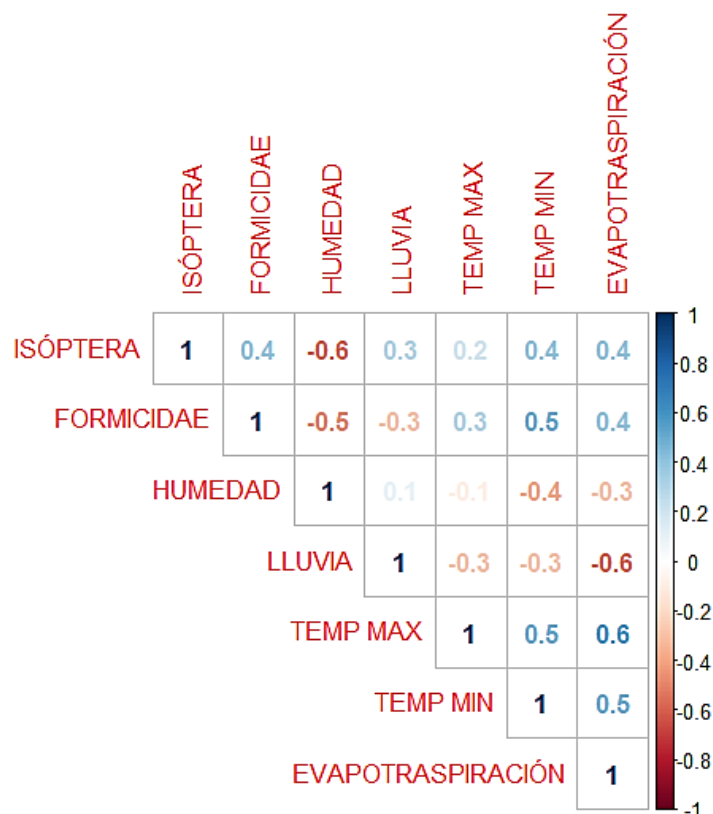


Figura 3.10. Correlaciones Anuales

Elaboración: Autor

También, se debe tomar en cuenta que las correlaciones entre las variables explicativas para la segunda fase metodológica (variables climáticas) tienen magnitudes altas, por lo cual, se debe tener cuidado ya que se puede tener problemas de multicolinealidad en los modelos a proponer (Gómez Gallego, 2014).

3.4. Metodología

La metodología se realizó en dos fases. Para capturar la dinámica temporal univariada de la variable abundancia de insectos, en primera instancia, se planteó la metodología Box-Jenkins con un modelo autorregresivo integrado de media móvil estacional (SARIMA) para cada serie. Esta metodología es usada puesto que según Alcamo et al. (2005), se puede tener tendencias estacionales significativas.

Luego, para 1) identificar el impacto de las estaciones en la abundancia de insectos y 2) encontrar el efecto de las variables climáticas (temperatura y humedad) en la abundancia de insectos a lo largo del tiempo se plantearon Modelos Lineales Generalizados (GLM).

A continuación, se realizará una descripción de las metodologías a utilizar en cada una de las series.

3.4.1. Box-Jenkins

Según Astuti & Jamaludin (2018), el modelo SARIMA se representa de la siguiente forma:

$$SARIMA(p, d, q) \times (P, D, Q)_s \quad (1)$$

Donde \mathbf{p} es la parte autorregresiva, \mathbf{q} la parte de media móvil y \mathbf{d} es el número de diferenciaciones regulares; P , D y Q son el orden autorregresivo estacional, el número de diferencias estacionales y el orden de media móvil estacional, respectivamente; y S es la duración del período estacional.

Siendo la abundancia de insectos Y en el tiempo t , el proceso se especifica de la siguiente forma:

$$\phi_p(B)\varphi_P(B^S)Y_t = \theta_q(B)\vartheta_Q(B^S)\omega_t \quad (2)$$

Donde ϕ , φ , θ y ϑ son los parámetros asociados al orden autorregresivo, autorregresivo estacional, media móvil y media móvil estacional, respectivamente. ω_t representa el residuo en el periodo de tiempo t . Con respecto a B es el operador de rezagos que se define de la siguiente forma:

$$B^s Y_t = Y_{t-s} \quad (3)$$

El proceso del modelo SARIMA involucra cuatro etapas que se detallan a continuación:

1. **Identificación.** Verificación de la estacionariedad de la serie, ya que los procedimientos de estimación sólo están disponibles para las series estacionarias (Adanacioglu & Yercanm, 2012). Se realiza la verificación de estacionariedad mediante la inspección grafica a partir de la Función de Autocorrelación Simple (FAS), la Función de Autocorrelación Parcial (FAP) y con la prueba formal de raíz unitaria Dickey Fuller aumentada. En caso de que la serie no sea estacionaria se procede a diferenciarla.

Así, si Y_t es la serie original la primera diferencia es:

$$X_t = Y_t - Y_{t-1} \quad (4)$$

Y la diferencia estacional al ser cuatro periodos al año es:

$$Z_t = Y_t - Y_{t-4} \quad (5)$$

El siguiente paso en el proceso de identificación es encontrar los valores iniciales para los órdenes de parámetros estacionales y no estacionales, p, q, y P, Q. Los cuales se podrían obtener buscando coeficientes significativos de las funciones de autocorrelación simple y autocorrelación parcial.

2. **Estimación.** Se utiliza el método de mínimos cuadrados ordinarios para estimar los parámetros de cada modelo.
3. **Diagnóstico.** Se escoge el modelo mediante los criterios de información: de Akaike (AIC). Y el criterio de información bayesiano (BIC).

$$AIC = -2 \log L + 2M \quad (6)$$

$$BIC = -2 \log L + M \log (n) \quad (7)$$

Donde L es la función de verosimilitud, M es la suma de los parámetros del modelo y n es el número total de observaciones.

Se analizan los residuos con el fin de determinar si estos son o presentan ruido blanco, independenciam y normalidad. Si los residuos no cumplen con esta condición se debe regresar al paso número 1.

4. **Pronóstico.** Se realiza el pronóstico de cada serie en un tiempo definido.

Cabe mencionar que, según Arellano et al. (2018) se recomienda alrededor de 50 datos para series estacionales y 20 para series anuales, para así, minimizar la incertidumbre y tener modelos con mayor robustez.

3.4.2. GLM

Debido a la naturaleza de la variable abundancia (de conteo), según Fox (1997), la metodología acorde son los Modelos Lineales Generalizados con las funciones de distribución de la familia Poisson.

En general, los Modelos Lineales Generalizados, los cuales fueron desarrollados por Nelder & Wedderburn (1972), tienen tres componentes:

- (i) componente aleatorio: vector aleatorio correspondiente a Y_i , con media μ
- (ii) componente sistemático: es el predictor lineal denotado como

$$n = X\beta \quad (8)$$

- (iii) función de enlace: es una función monótona y derivable que relaciona la esperanza matemática derivable con el predictor lineal

$$n = g(u) \quad (9)$$

Donde X es el vector de variables independientes y β el vector de parámetros asociados a estas variables. Al ser datos de conteo se utilizará la familia de funciones de distribución Poisson, las cuales en general vienen dadas por:

$$g(u_i) = X_i^t \beta \quad (10)$$

El valor de la media predicha es:

$$Y_{|x} \sim \text{Poisson}(\exp(\beta X)) \quad (11)$$

Para la estimación se empleará el método de la máxima verosimilitud. Según los autores el supuesto más importante del modelo es que la media debe ser igual a la varianza:

$$\mu = \text{Var}(Y_i) \quad (12)$$

De no ser el caso, este supuesto puede ser superado al usar la variante Quasi-Poisson que, según Ver Hoef & Boveng (2007), utiliza la misma especificación, pero, suponiendo que la varianza es la media multiplicada por un parámetro φ :

$$\mu = \varphi Var(Y_i) \quad (13)$$

Donde φ es el parámetro de dispersión, se asume constante y explica la relación media-varianza.

Para la interpretación de los estimadores de manera cuantitativa basta con multiplicar por 100 cada uno de los estimadores obteniendo así el cambio en el número medio de la variable Y cuando la variable X crece en una unidad.

Capítulo 4

4. Resultados y Discusión

En este capítulo se presentan los resultados de las estimaciones de los modelos definidos en la sección 3.3. Se presentan los primeros tres pasos de la metodología Box-Jenkins, a continuación, el pronóstico para cada serie de forma univariada con los modelos SARIMA. Luego, se presentan las estimaciones que se obtuvieron con el efecto de la estacionalidad y las variables climáticas en los modelos lineales generalizados (GLM).

4.1. Box-Jenkins

En esta primera fase se presentan los cuatro pasos de la metodología Box-Jenkins para las nueve series estudiadas.

4.1.1. Identificación, estimación y diagnóstico

4.1.1.1. Coleoptera

En la Figura 4.1 se presentan las funciones FAS y FAP para la serie Coleoptera, mediante la inspección gráfica en la Figura 4.1 se puede observar que presenta indicios de no estacionariedad, por lo cual, se realiza el test formal de Dickey-Fuller aumentado, encontrando que la serie no es estacionaria según la Tabla 4.1.

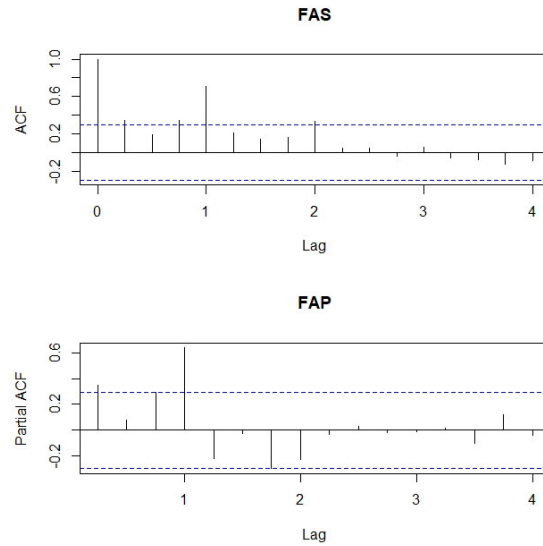


Figura 4.1. FAS Y FAP Coleoptera
Elaboración: Autor

Tabla 4. 1. Resultados de la Prueba de Dickey-Fuller aumentada

	Forma funcional de la prueba	p-valor
Coleoptera		
Serie	Con constante, tendencia lineal y tres rezagos.	0.85
Serie diferenciada	Con constante, tendencia lineal y tres rezagos.	0.01
Hemiptera		
Serie	Con constante, tendencia lineal y dos rezagos.	0.01
Lepidoptera		
	Con constante, tendencia lineal y tres rezagos.	0.045
Hymenoptera		
Serie	Con constante, tendencia lineal y cuatro rezagos.	0.33
Serie estacionalmente diferenciada	Con constante, tendencia lineal y tres rezagos.	0.017
Formicidae LT		
Serie	Con constante, tendencia lineal y dos rezagos.	0.01

Isoptera LT I		
Serie	Con constante, tendencia lineal y tres rezagos.	0.02
Isoptera LT II		
Serie	Con constante, tendencia lineal y tres rezagos.	0.01
Isoptera		
Serie	Con constante, tendencia lineal y dos rezagos.	0.04
Formicidae		
Serie	Con constante, tendencia lineal y tres rezagos.	0.01

Elaboración: Autor

Se procede a diferenciar la serie en su parte regular. Se vuelve a realizar la prueba de raíz unitaria en la serie diferenciada y resulta ser estacionaria. Se presenta las funciones de auto correlación simple y parcial en la Figura 4.2.

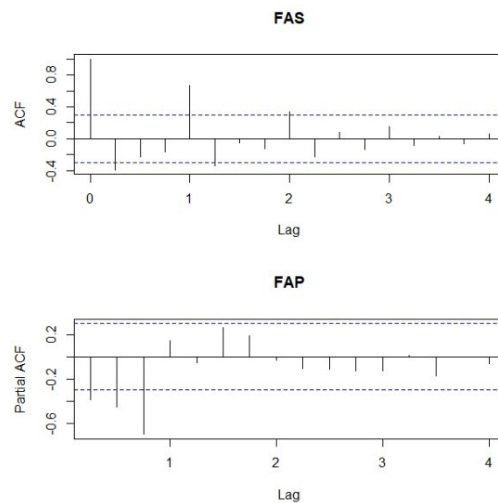


Figura 4.2. FAS y FAP de la serie Coleoptera Diferenciada

Elaboración: Autor

Tomando en cuenta la FAS, FAP se plantea tres modelos: SARIMA (2,1,0) (1,0,0), SARIMA (2,1,1) (1,0,0), SARIMA (3,1,1) (1,0,1). Tomando en cuenta los criterios de información de AIC y BIC se escoge el modelo: SARIMA (2,1,0) (1,0,0) según lo descrito en la Tabla 4.2. Luego, se realiza la estimación mediante mínimos cuadrados ordinarios.

Tabla 4.2. Elección de modelos considerando los criterios de información

Serie	Modelo 1			Modelo 2			Modelo 3		
		AIC	BIC		AIC	BIC		AIC	BIC
Coleptera	SARIMA	595.1	602.1	SARIMA	595.2	604.0	SARIMA	596.6	608.9
	(2,1,0)			(2,1,1)			(3,1,1)		
	(1,0,0)*			(1,0,0)			(1,0,1)		
Hemiptera	SARIMA	461.7	468.8	SARIMA	463.6	472.5	SARIMA	460.1	465.5
	(1,0,0)			(1,0,0)			(0,0,0)		
	(1,0,0)			(1,0,1)			(1,0,0)*		
Lepidoptera	SARIMA	659.8	668.8	SARIMA	662.7	671.6	SARIMA	658.3	668.5
	(1,0,1)			(1,0,0)			(0,0,1)		
	(0,0,1)			(1,0,1)			(0,0,1)*		
Hymenoptera	SARIMA	558.7	565.4	SARIMA	557.7	562.8	SARIMA	558.4	566.8
	(1,0,1)			(1,0,0)			(1,0,0)		
	(0,1,1),			(0,1,1)*			(2,1,1)		
Formicidae LT	SARIMA	528.1	535.2	SARIMA	530.1	539.0	SARIMA	527.5	536.4
	(0,0,0)			(1,0,0)			(2,0,0)		
	(2,0,0)*			(2,0,0)			(1,0,0)		
Isoptera LT I	SARIMA	481.6	488.7	SARIMA	479.7	485.1	SARIMA	486.4	491.7
	(1,0,0)			(0,0,0)			(1,0,0)		
	(1,0,0)			(1,0,0)*			(0,0,0)		
Isoptera LT II	SARIMA	431.7	440.2	SARIMA	435.0	442.1	SARIMA	431.3	436.7
	(1,0,0)			(0,0,1)			(0,0,0)		
	(1,0,1)			(1,0,0)			(0,0,1)*		
Isoptera	ARIMA	77.8	79.0	ARIMA	78.9	80.5	ARIMA	76.2	77.3
	(1,0,0)*			(1,0,1)			(0,0,1)		
Formicidae	ARIMA	140.5	141.6	ARIMA	142.3	143.8	ARIMA	140.5	141.7
	(1,0,0)*			(1,0,1)			(0,0,1)		

*Modelo escogido

Elaboración: Autor

Con respecto a la validación del modelo, se verifica la normalidad de los residuos con el test de Shapiro-Wilk (0.00) resultando ser normales, además, se verifica la independencia con el test de Ljung-Box. Se presentan los residuos en la Figura 4.3 de manera gráfica para corroborar los test realizados. Además, se puede verificar que no existen autocorrelaciones significativas.

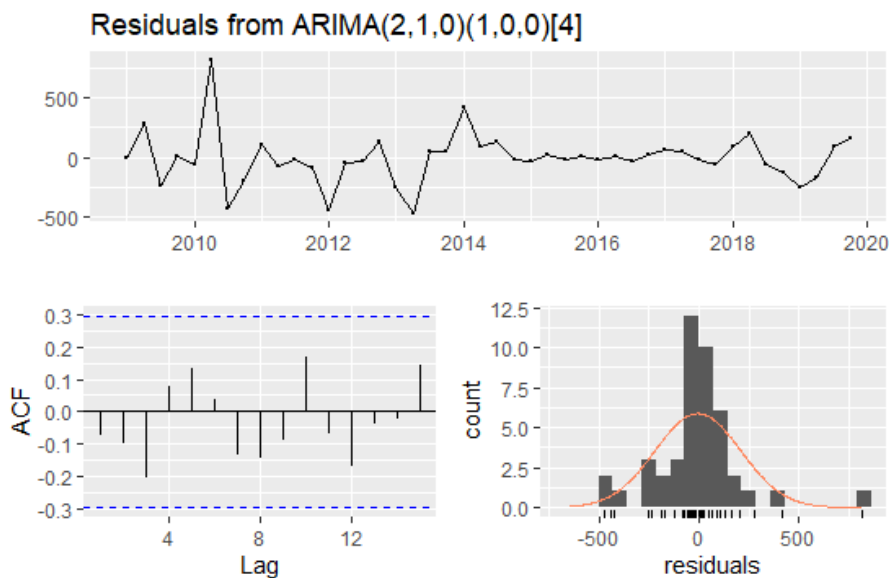


Figura 4.3. Diagnóstico Coleoptera

Elaboración: Autor

4.1.1.2. Hemiptera

En la segunda serie también se plantea una modelización SARIMA, en la Figura 4.4 se presentan la FAS y FAP de la serie. Mediante la inspección gráfica se verifica que no existen retardos significativos, al hacer la prueba formal se verifica que la serie es estacionaria según lo descrito en la Tabla 4.1.

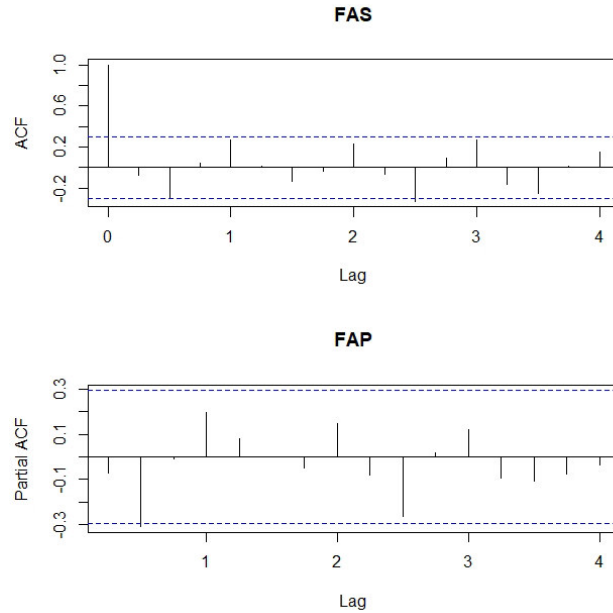


Figura 4.4. FAS Y FAP Hemiptera

Elaboración: Autor

Se plantean, de manera preliminar, tres modelos: SARIMA (1,0,0) (1,0,0), SARIMA (1,0,0) (1,0,1) y SARIMA (0,0,0) (1,0,0). Y, utilizando los criterios de información se escoge el modelo SARIMA (0,0,0) (1,0,0), del cual, se verifica el comportamiento de los residuos para cumplir con el diagnóstico del modelo.

Los residuos del modelo cumplen con la normalidad con el test Shapiro-Wilk (0.04) y se verificó su independencia con el test de Ljung-Box. Con respecto a la correlación serial se presenta en la Figura 4.5 que cumple al no tener retardos significativos y se puede verificar de manera gráfica la normalidad e independencia.

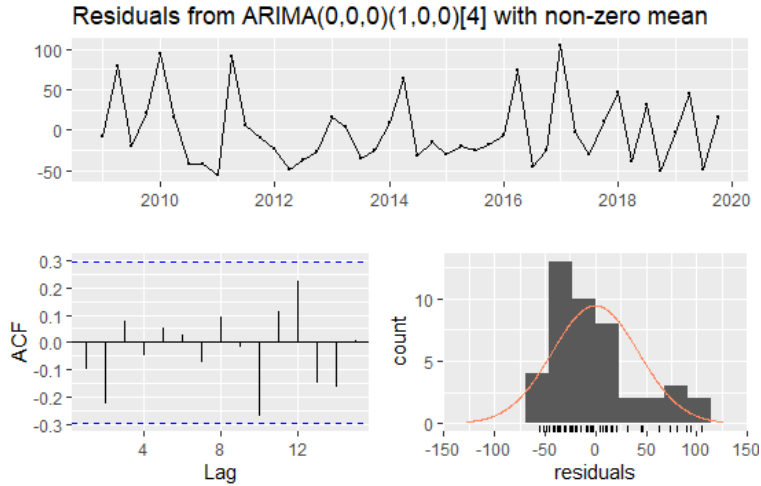


Figura 4.5. Diagnóstico Hemiptera

Elaboración: Autor

4.1.1.3. Lepidoptera

En la Figura 4.6 se presentan las funciones de autocorrelación de la serie Lepidoptera, se puede observar que parece tener un comportamiento estacionario, verificando con la prueba de Dickey-Fuller resulta ser estacionaria.

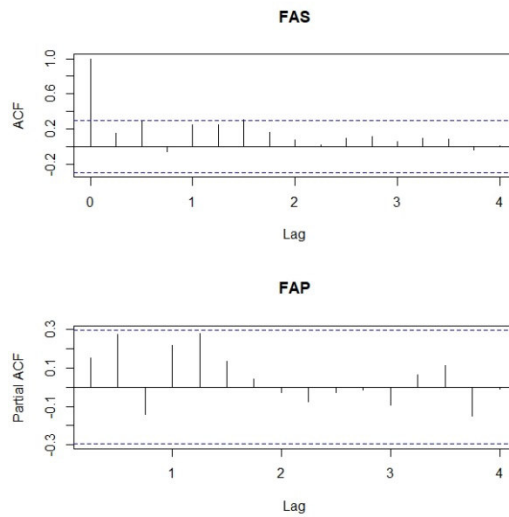


Figura 4.6. FAS y FAP serie Lepidoptera

Elaboración: Autor

Se procede a formular algunos modelos: SARIMA (1,0,1) (0,0,1), SARIMA (1,0,0) (1,0,1) y SARIMA (0,0,1) (0,0,1). Utilizando los criterios de información AIC y BIC se escoge el modelo SARIMA (0,0,1) (0,0,1) y se continua con el siguiente paso de verificación de sus residuos para la validación del modelo.

Los residuos del modelo resultaron ser normales bajo la prueba de Shapiro-Wilk, además, son independientes según el resultado de la prueba de Ljung-Box. Además, en la Figura 4.7 se presenta de manera gráfica que los residuos no siguen un patrón, no tiene correlación serial y son normales.

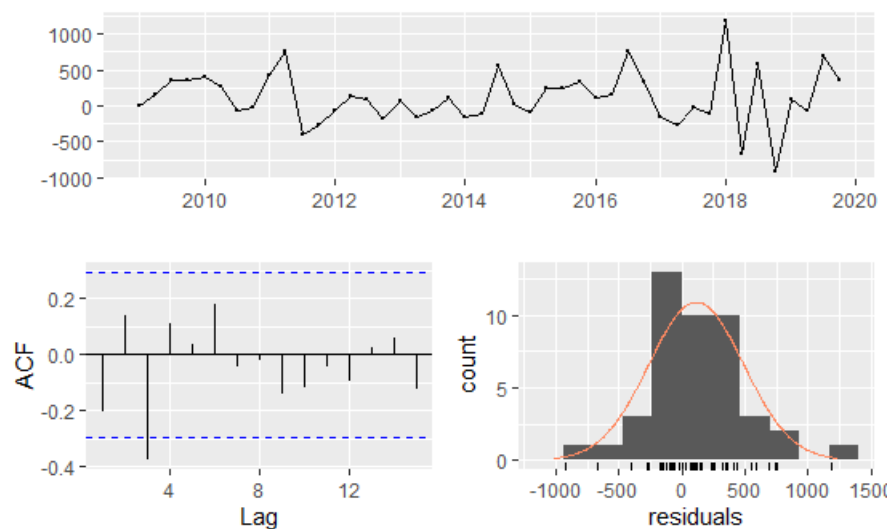


Figura 4.7. Diagnóstico Lepidoptera

Elaboración: Autor

4.1.1.4. Hymenoptera

Se presentan las funciones de autocorrelación en la Figura 4.8 de la serie Hymenoptera, se puede observar que la función de autocorrelación simple presenta un comportamiento de no estacionariedad, verificando con la prueba formal se lo corrobora. Según lo descrito en la FAS se realiza una diferenciación en la parte estacional.

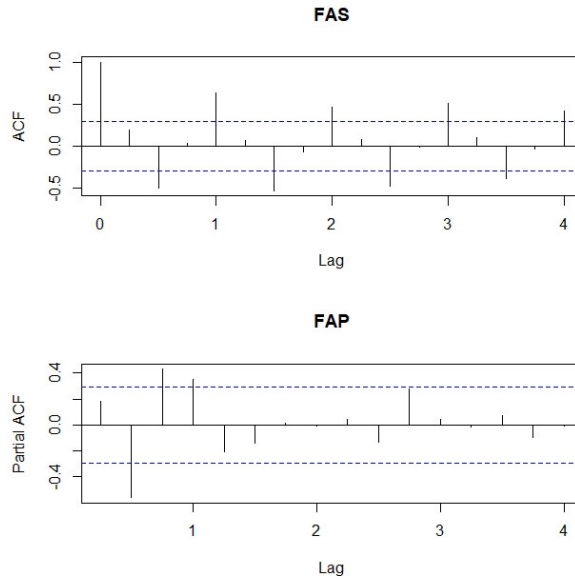


Figura 4.8. FAS y FAP Hymenoptera
Elaboración: Autor

En la Figura 4.9 se presentan las funciones de autocorrelación la serie diferenciada, se realiza la prueba de raíz unitaria y resulta ser estacionaria.

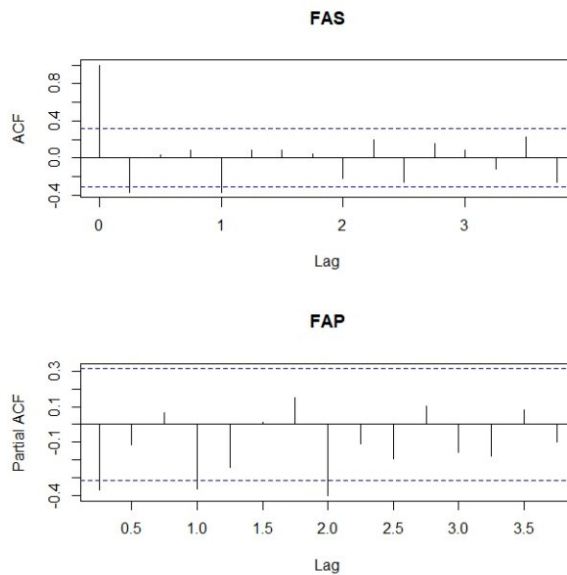


Figura 4.9. FAS y FAP Hymenoptera diferenciada estacional
Elaboración: Autor

Según lo descrito en la Figura 4.9 se proponen los modelos: SARIMA (1,0,1) (0,1,1), SARIMA (1,0,0) (0,1,1) y SARIMA (1,0,0) (2,1,1). Se utilizan los criterios de información para escoger encontrando como mejor ajuste al modelo SARIMA (1,0,0) (0,1,1) según lo descrito en la Tabla 4.2.

Continuando con el diagnóstico del modelo escogido, se procede a verificar el comportamiento de los residuos. Con la prueba de Shapiro-Wilk se encuentra que los residuos son normales, además, son independientes según la prueba de Ljung-Box. Para verificar la independencia se grafica las funciones de autocorrelación de los residuos, verificando que no presentan relaciones significativas. En la Figura 4.10 se verifica los resultados de los test realizados.

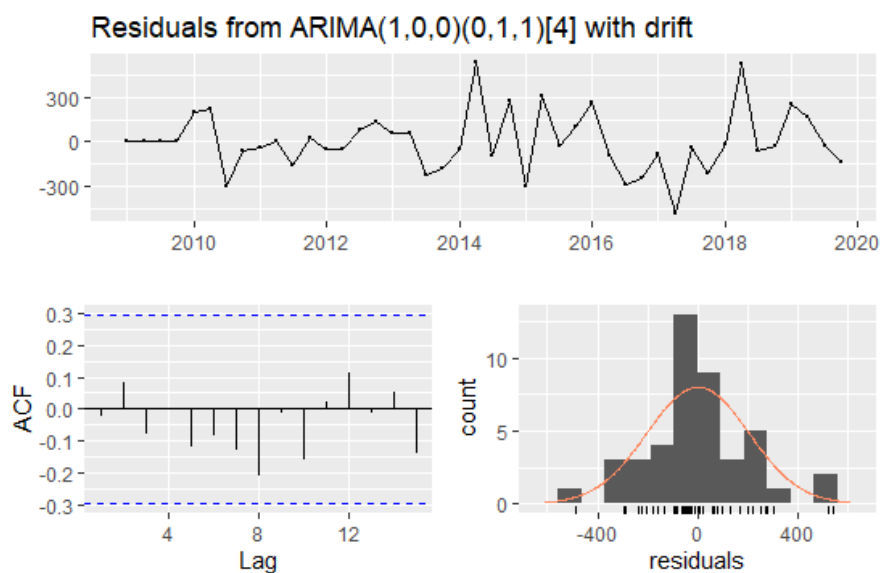


Figura 4.10. Diagnóstico Hymenoptera

Elaboración: Autor

4.1.1.5. Formicidae LT

En la Figura 4.12 se presentan las funciones de autocorrelación de la serie Formicidae LT, la serie parece tener un comportamiento estacionario y esto se corrobora con la prueba de Dickey-Fuller aumentada.

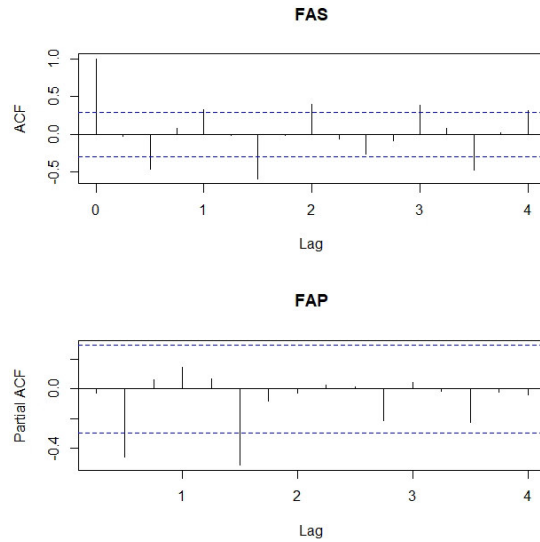


Figura 4.11. FAS y FAP Formicidae LT

Elaboración: Autor

Se propone y estima los modelos: SARIMA (0,0,0) (2,0,0), SARIMA (1,0,0) (2,0,0) y SARIMA (2,0,0) (1,0,0). Según los criterios de información se escoge el modelo SARIMA (0,0,0) (2,0,0). Verificando los residuos del modelo se presenta la Figura 4.13, además, se realizan las pruebas formales de independencia, normalidad y correlación serial.

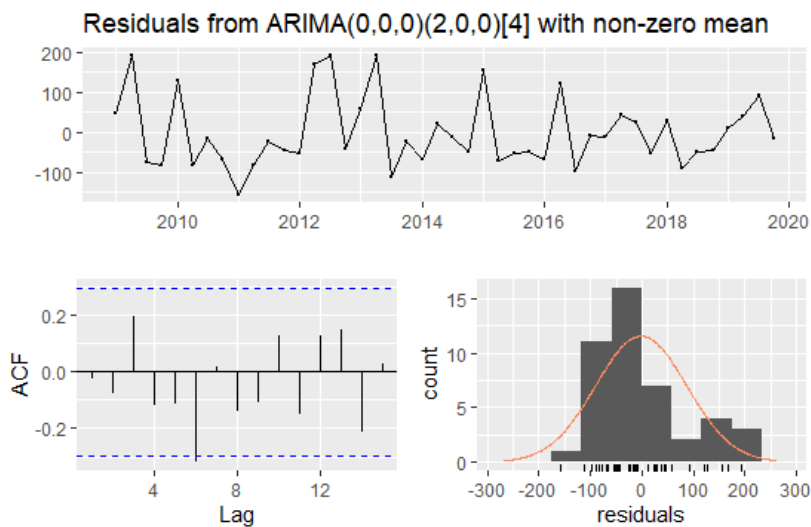


Figura 4.12. Diagnóstico Formicidae LT

Elaboración: Autor

En la Figura 4.12 se presenta que los residuos parecen no tener un patrón. También, se presenta que tiene un rezago en la función de autocorrelación significativo, pero, la prueba formal corrobora que no existe autocorrelación serial.

4.1.1.6. Isoptera LT I

Se presenta las funciones de autocorrelación de Isoptera I en la Figura 4.13, se puede observar un comportamiento estacionario, lo cual, es corroborado por la prueba de raíz unitaria de Dickey-Fuller aumentada según lo descrito en la Tabla 4.1.

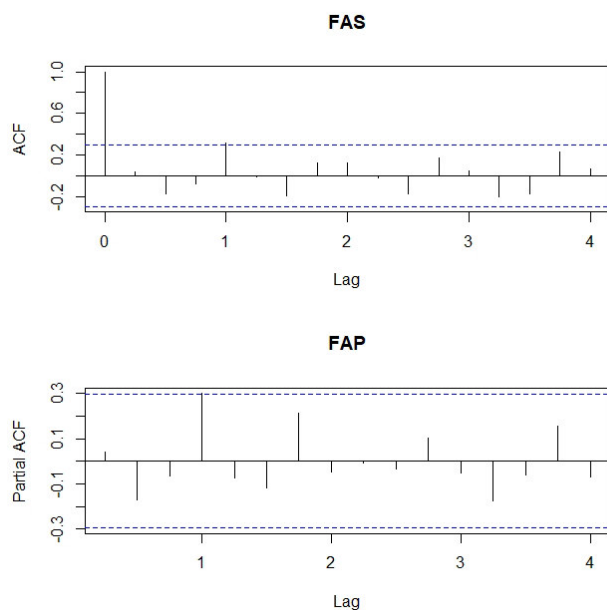


Figura 4.13. FAS y FAP Isoptera LT I

Elaboración: Autor

Tomando en cuenta el gráfico anterior, se proponen los modelos: SARIMA (1,0,0) (1,0,0), SARIMA (0,0,0) (1,0,0) y SARIMA (1,0,0) (0,0,0). Según los criterios de información se escoge el modelo SARIMA (0,0,0) (1,0,0). Se procede a validar el modelo verificando el comportamiento de los residuos.

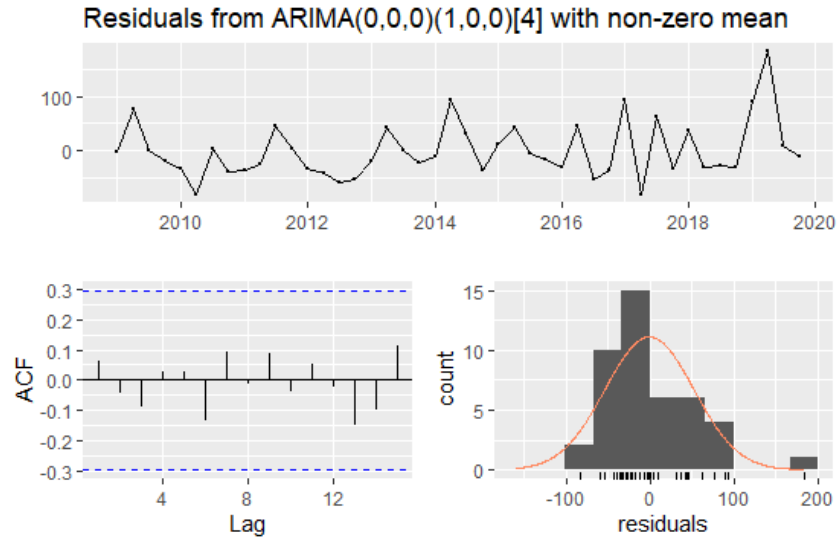


Figura 4.14. Diagnóstico Isoptera LT I

Elaboración: Autor

En la Figura 4.15 se verifica que los no tienen algún patrón, son normales y no tienen autocorrelación serial.

4.1.1.7. Isoptera LT II

En la Figura 4.15 se verifica que la serie parece ser estacionaria, esto, corroborado por la prueba de raíz unitaria que se puede verificar en la Tabla 4.1. Se procede con la identificación planteando algunos modelos: SARIMA (1,0,0) (1,0,1), SARIMA (0,0,1) (1,0,0) y SARIMA (0,0,0) (0,0,1). Bajo los criterios de información AIC y BIC se escoge el modelo: SARIMA (0,0,0) (0,0,1).

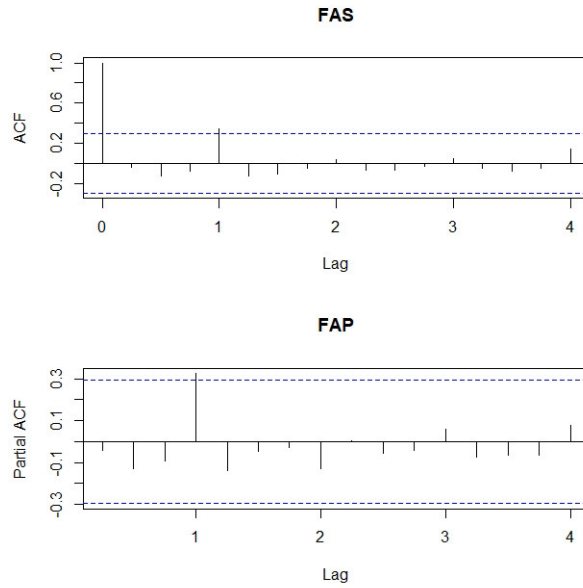


Figura 4.15. FAS y FAP Isoptera LT II

Elaboración: Autor

Se realiza el diagnóstico del modelo escogido verificando el comportamiento de los residuos con gráficos y pruebas formales. En la Figura 4.16 se observa que no tienen un patrón, no tienen autocorrelación y son normales.

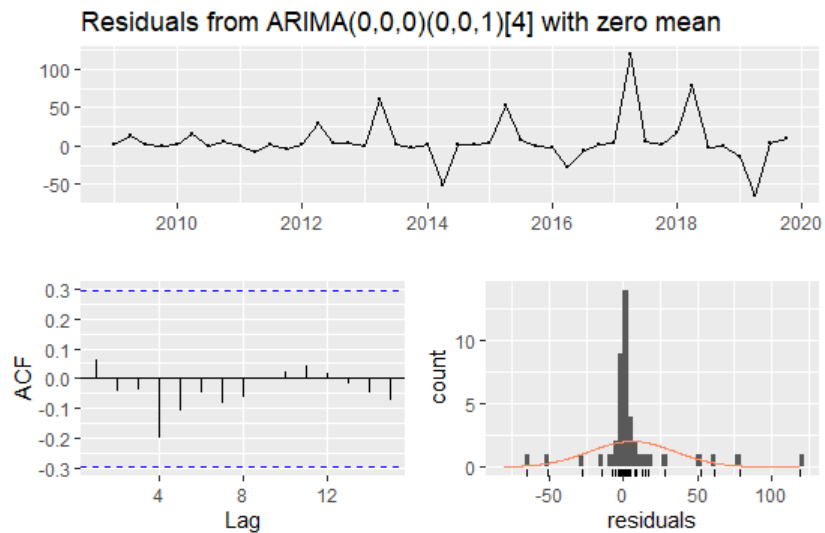


Figura 4.16. Diagnóstico Isoptera LT II

Elaboración: Autor

4.1.1.8. Isoptera

En la Figura 4.17 se presentan las funciones de autocorrelación simple y parcial de la serie. Se puede verificar que es estacionaria en la Tabla 4.1. Se procede a plantear algunos modelos: ARIMA (1,0,0), ARIMA (1,0,1) y ARIMA (0,0,1). Tomando en cuenta los criterios de información se escoge el modelo ARIMA (1,0,0), según lo descrito en la Tabla 4.2.

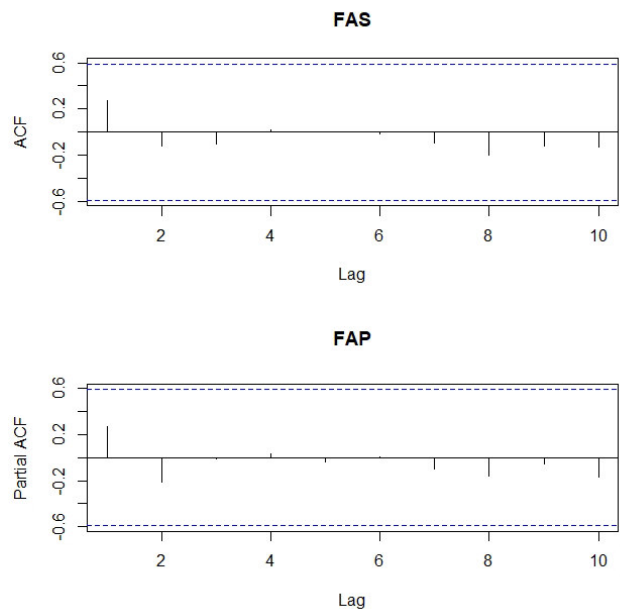


Figura 4.17. FAS y FAP Isoptera

Elaboración: Autor

Tomando en cuenta el modelo escogido, se procede al diagnóstico. El comportamiento de los residuos se presenta en la Figura 4.18.

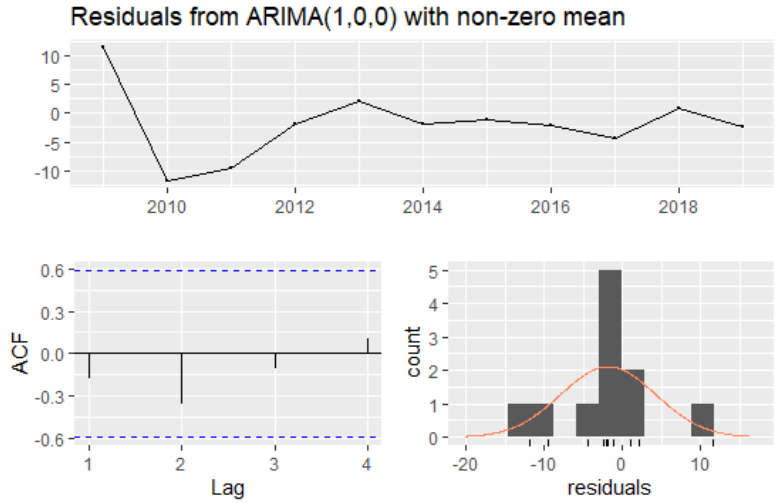


Figura 4.18. Diagnóstico Isoptera

Elaboración: Autor

4.1.1.9. Formicidae

En la Figura 4.19 se verifica que la serie es estacionaria, además, se lo corrobora con la prueba de raíz unitaria. Se presentan como opciones los modelos: ARIMA (1,0,0), ARIMA (1,0,1) y ARIMA (0,0,1). Y se escoge el modelo ARIMA (0,0,1) para la modelización.

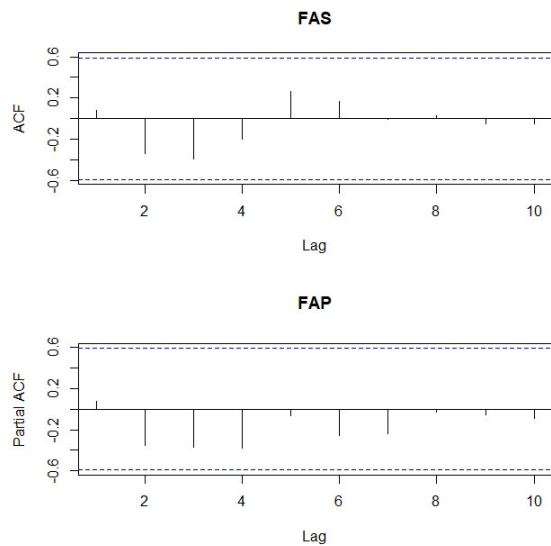


Figura 4.19. FAS y FAP Formicidae

Elaboración: Autor

Verificando el comportamiento de los residuos se presenta la Figura 4.20 que muestra que cumplen con los supuestos de normalidad, independencia y no correlación serial.

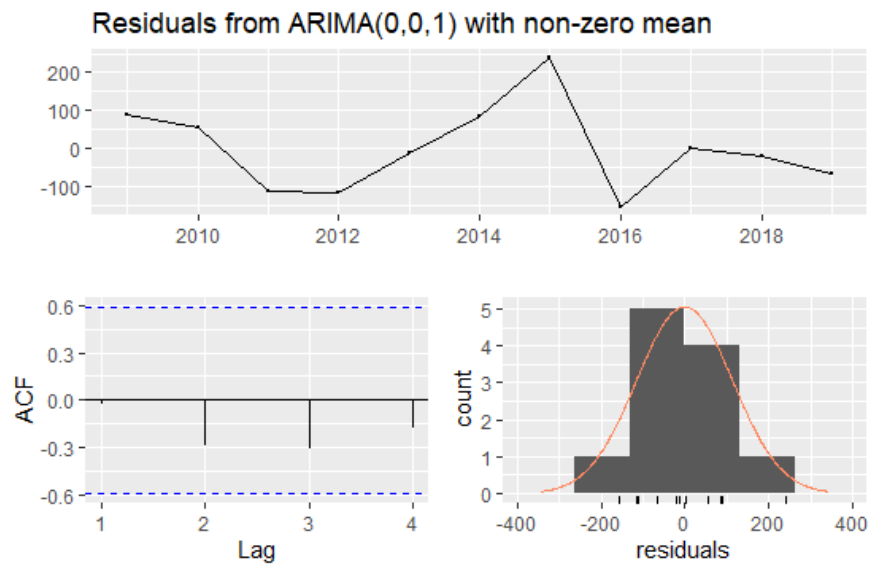


Figura 4.20. Diagnóstico Formicidae

Elaboración: Autor

4.1.2. Pronóstico

La abundancia de insectos ha tenido cambios constantes, pues el análisis descriptivo se reportó que las diferentes especies de insectos cambiaron su abundancia, teniendo series con tendencias positivas y negativas.

Se propone verificar cual es la tendencia del pronóstico reportado para el año 2020 en contraste con el año 2019 propuesta por cada uno de los modelos SARIMA en la Figura 4.1.

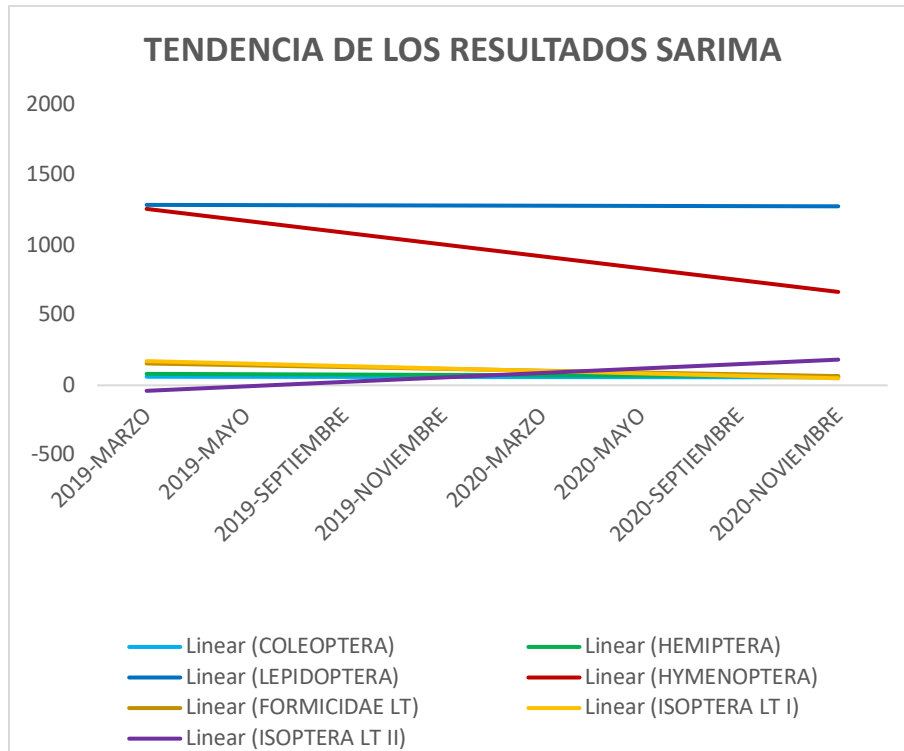


Figura 4.21. Tendencia resultados series trimestrales.

Elaboración: Autor

Los insectos tienen un comportamiento diferente según sus características taxonómicas, de hecho, los resultados de cada modelo planteado corroboran esta premisa. El pronóstico para cuatro de las siete series analizadas es que su abundancia se mantendrá constante para el año 2020. Una de las series a las cuales se les pronostica una tendencia casi constante es Coleoptera, pese a que la tendencia general de esta serie ha sido a la baja sus valores en los últimos años fueron muy poco volátiles y menores a 500, se pronostica que sigan así. Esta serie llama mucho la atención, el tener en los cuatro primeros años abundancias de más de 1.500 insectos para luego caer a menos de 500 al año. Además, el pronóstico para la serie Isoptera LT II tiene un buen panorama ya que muestra que puede tener un crecimiento en su abundancia para el año 2020.

Por otra parte, se pronostica una tendencia a la baja de Hymenoptera e Isoptera LT I para el año 2020, corroborando lo planteado por algunos autores sobre la sexta extinción masiva de especies.

Tabla 4.3. Pronóstico series trimestrales

Serie	n	Frecuencia	Modelo		2020-Mar.	2020-Mayo	2020-Sep.	2020-Nov.
COLEOPTERA	44	4 recolecciones al año	SARIMA (2,1,0) (1,0,0)	L.Sup	580	710	760	842
				Coef	0	53	83	51
				L.Inf	0	0	0	0
HEMIPTERA	44	4 recolecciones al año	SARIMA (0,0,0) (1,0,0)	L.Sup	147	151	129	142
				Coef	76	81	59	72
				L.Inf	5	10	0	1
LEPIDOPTERA	44	4 recolecciones al año	SARIMA (0,0,1) (0,0,1)	L.Sup	1934	1945	1955	1965
				Coef	1483	139	1552	1510
				L.Inf	625	0	604	594
HYMENOPTERA	44	4 recolecciones al año	SARIMA (1,0,0) (0,1,1)	L.Sup	1600	1673	1004	966
				Coef	1238	1300	630	592
				L.Inf	876	925	254	217
FORMICIDAE LT	44	4 recolecciones al año	SARIMA (0,0,0) (2,0,0)	L.Sup	265	272	231	203
				Coef	116	123	83	54
				L.Inf	0	2	0	0
ISOPTERA LT I	44	4 recolecciones al año	SARIMA (0,0,0) (1,0,0)	L.Sup	208	225	156	137
				Coef	121	138	69	49
				L.Inf	32	49	0	0
ISOPTERA LT II	44	4 recolecciones al año	SARIMA (0,0,0) (2,0,0)	L.Sup	35	5	51	56
				Coef	136	0	206	220
				L.Inf	0	0	3	7

Elaboración: Autor

Este análisis aporta una idea general de cuál será el comportamiento de los insectos al futuro, pero resulta pertinente mostrar cual será el efecto de manera cuantitativa. Por eso, En la Tabla 4.3 se puede observar los modelos ajustados y validados para cada serie, también, los resultados del pronóstico de los modelos SARIMA para las siete series que tienen una frecuencia trimestral.

Con respecto a los hemípteros, se pronostica un decrecimiento de 296 insectos recolectados en el año 2019 a 288 en el año 2020, así, continuando con la pequeña tendencia descrita en la Figura 3.1, con respecto a la variación estacional se pronostica que se recolecten más insectos en la estación seca, en concordancia, con lo expuesto en su estadística descriptiva.

La tendencia expuesta en la estadística descriptiva en los lepidópteros muestra un crecimiento marcado en la abundancia hasta 5500 insectos recolectados en 2019, no obstante, en el pronóstico se muestra un decrecimiento a menos de 5000 insectos para el 2020. Cabe recordar, que esta serie tenía un comportamiento diferente a las demás con mayor abundancia en las recolecciones de estación húmeda, esto se corrobora en su pronóstico con mayor abundancia para la recolección de septiembre.

Los himenópteros de las familias Apidae y Halictidae presentan en su pronóstico un pequeño decrecimiento en su abundancia anual, a la inversa, de lo expuesto en el capítulo anterior. También, en esta serie se puede corroborar que estas familias de insectos tienen mayor actividad o sus ciclos fenológicos hacen que presenten mayor abundancia en la estación seca con más del doble de la abundancia con respecto a la estación húmeda.

Las hormigas recolectadas en trampas de luz, pese a que su tendencia reportada es casi constante, venían de un repunte en su abundancia anual pasando de 188 insectos en 2018 a 494 en 2019, su pronóstico reporta que abra un decrecimiento a 376 insectos en el año 2020. Con respecto a la variación de abundancia entre recolecciones, las hormigas tienen una tendencia a que su abundancia sea mayor en la estación seca con 116 hormigas pronosticadas para marzo y 123 para mayo según lo expuesto en la Tabla 4.3.

En la serie Isoptera LT I se pronostica una abundancia para el año 2020 de 377 insectos presentando un decrecimiento con respecto al año anterior en el cual fueron 512, pero, cabe

mencionar que en el año 2019 se presentó la máxima abundancia en los 11 años muestreados. La variación entre recolecciones ha tenido un pronóstico acorde a lo reportado en la estadística descriptiva, con más del doble de abundancia en la estación seca que en la estación húmeda.

Las termitas y rhyotermitas recolectadas con trampas de luz han tenido un comportamiento cambiante, con dos picos muy altos, su pronóstico para el 2020 es recolectar 562 insectos, es decir, un aumento con respecto al año anterior. En la variación estacional se puede verificar que existen discrepancias en el pronóstico con respecto a lo reportado en el capítulo anterior, por ejemplo, el cambio de estación seca a húmeda ha sido el periodo de mayor recolección según la estadística descriptiva, pero en el pronóstico se refleja que se espera un valor de 0 para el año 2020. Además, en el Anexo 9 se puede verificar el gráfico de cada serie añadiéndole su pronóstico.

Ahora, se procede a presentar los resultados de las dos series restantes, las cuales, tuvieron recolecciones con frecuencia anual, por lo cual su análisis es limitado con respecto a la variación entre estaciones que si se pudo realizar con las siete series ya expuestas. Cabe mencionar que en estas series se cae en un caso particular de los modelos SARIMA llamado modelos ARIMA, los cuales siguen la misma metodología, pero sin tomar en cuenta la variación estacional (Farsi et al., 2021). En la Tabla 4.4 se encuentra la tabla resumen de los modelos validados de estas dos series y su respectivo pronóstico para el año 2020 y 2021.

Tabla 4.4. Resumen pronóstico series anuales

Serie	n	Frecuencia	Modelo		Pronóstico 2020	Pronóstico 2021
Formicidae	11	1	Arima(1,0,0)	L. Inf	23	28
				Estim	342	347
				L. Sup	666	678
Isoptera III	11	1	Arima(1,0,0)	L. Inf	0	1
				Estim	13	14
				L. Sup	38	32

Elaboración: Autor

También, en la Figura 4.2 se presenta el pronóstico para las hormigas recolectadas con trampas Winkler.

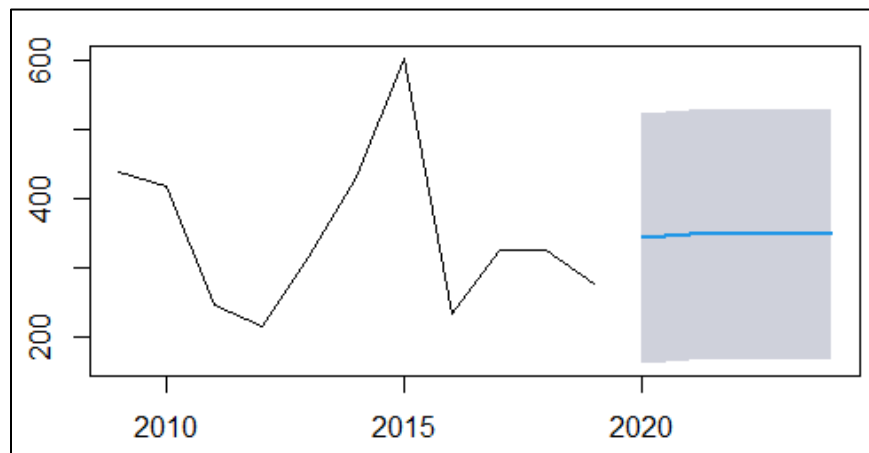


Figura 4.22. Pronóstico Formicidae.

Elaboración: Autor

En el gráfico se puede observar que el pronóstico para la abundancia de hormigas muestra un crecimiento para el año 2020 a 342 con respecto a las 277 recolectadas en el año 2019, luego, se espera que la abundancia suba un poco más hasta 348 en 2021. Al esperar que la abundancia de hormigas suba en un 24 % para el 2020 es un resultado interesante y al tener aumentos de temperatura pronosticada es una manera de corroborar la Hipótesis planteada en este trabajo.

En la Figura 4.3 se presentan los pronósticos para la serie Isoptera en el cual se puede observar que se espera un crecimiento partiendo de una abundancia de 11 insectos en promedio en 2019 se pronostica recolectar 13 para 2020 y 14 para el año 2021 y su tendencia seguirá al alza. Es decir, se pronostica un aumento del 18 % en la abundancia de los isópteros para el año 2020.

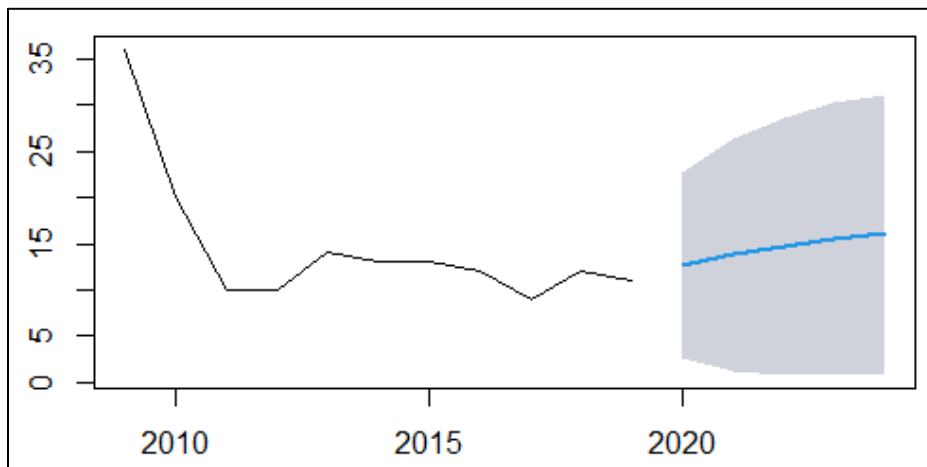


Figura 4.23. Pronóstico Isoptera.

Elaboración: Autor

Según lo expuesto, las series tienen tendencias diferentes (debido a su taxonomía) de lo cual ya se pueden sacar conclusiones interesantes, pero al contar con las variables del clima se procede a incluirlas en el análisis.

4.2. GLM

4.2.1. Validación

En el caso de la regresión Poisson, el supuesto fundamental es que la esperanza y la varianza de la variable respuesta sean iguales (Nelder & Wedderburn, 1972). Por eso, se procede a verificar el término de dispersión de cada modelo (descrito en el Capítulo 3), lo cual, se presenta en la Tabla 4.5. Además, en la Tabla 4.5 se presentan los resultados de los test de validación de los modelos y pruebas de bondad y ajuste.

Tabla 4.5. Resumen prueba de dispersión

Serie	Validación			Bondad de ajuste	
	Factor de Dispersión	Normalidad	Homocedasticidad	Devianza	Wald test
Coleoptera	198.5	0.022	0.014	0.00	49.89
Hemiptera	17.0	0.012	0.023	0.00	43.09
Lepidoptera	182.2	0.031	0.033	0.01	44.59
Hymenoptera	91.2	0.023	0.014	0.00	66.5
Formicidae	51.4	0.036	0.049	0.00	33.5
LT					
Isoptera LT I	36.1	0.042	0.025	0.00	47.2
Isoptera LT	22.9	0.045	0.017	0.00	89.2
II					
Formicidae	33.5	0.015	0.025	0.01	33.2
Isoptera	59.6	0.039	0.022	0.00	48.2

Elaboración: Autor

Al mostrar que existe sobredispersión (todos los valores mayores a uno) en todos los modelos, se procede a estimar todos los modelos mediante la variante Quasipoisson, según lo descrito en el capítulo anterior. Luego, se verifica que los residuos de los modelos siguen una distribución normal al pasar el test de Shapiro-Wilk en la tercera columna de la Tabla 4.5.

Se verifica que no exista multicolinealidad, se usa el Factor de Inflación de la Varianza (VIF) el cual mide el efecto combinado que tienen las dependencias entre los regresores sobre la varianza de este término, donde valores mayores a 10 indican que existe multicolinealidad (Nelder & Wedderburn, 1972). Para los modelos seleccionados, se presenta en el Anexo 11 que todos los valores de VIF son menores a cinco, por lo cual, no existe problemas de multicolinealidad.

Con respecto a la homocedasticidad se realizó la prueba de Breusch-Pagan, los resultados se pueden verificar en la Tabla 4.5, los cuales, aceptan la presencia de homocedasticidad en los

residuos. Además, se realizaron algunas pruebas de bondad de ajuste, como la devianza, la cual, permite saber si un modelo describe de manera correcta los datos (Nelder & Wedderburn, 1972) y el p-valor debe ser menor a 0.05, realizando este test se puede verificar que todos los modelos pasan según lo descrito en la Tabla 4.5. También, se realiza el test de Wald, el cual, es una prueba de bondad y ajuste para saber si el modelo se ajusta de manera adecuada a los datos (Nelder & Wedderburn, 1972).

4.2.2. Resultados de GLM

En esta sección se presentan los resultados referentes a los modelos lineales generalizados para cada serie para verificar el efecto cuantitativo y cualitativo de cada una de las variables climáticas y de las estaciones en la abundancia de insectos en los años analizados. Como se explica en la sección anterior, solo se incluye la variable estacional en las series de tiempos con colectas trimestrales. En este punto se analiza el efecto que presentan las variables. Se diferirá la hipótesis propuesta, misma que sugiere un crecimiento de la abundancia de insectos a medida que exista un incremento en la temperatura. Asimismo, demostrar el efecto de otras variables climáticas, debido a que ha sido poco estudiado y más aún en los trópicos, de acuerdo a lo expuesto en la segunda sección.

Se analiza su valor estimado del cual interesa identificar el efecto de manera cualitativa (relación directa o inversa) según su signo. A continuación, se expone el efecto que tiene cada variable explicativa en la abundancia de la serie de manera cuantitativa, y luego, se expondrá la significancia de cada uno de los estimadores expuestos.

Cabe mencionar que para cada una de los modelos se estimaron por máxima verosimilitud, además, se debe recordar que cada modelo debe cumplir que su media es igual a su varianza. En todas las series se encontró al parámetro de dispersión mayor a 1, entonces, por lo expuesto en el capítulo anterior se procedió a estimar con los modelos Quasi-Poisson.

En esta segunda fase se reporta que en base a la razón de máxima verosimilitud y al criterio de información se seleccionó los modelos presentados en la Tabla 4.6 y Tabla 4.7 como los modelos que se ajustan de mejor manera a los datos en cada serie.

Tabla 4.6. Efecto de las variables climáticas y estacionales en la abundancia de insectos series trimestrales

Se incluyen 2 variables ambientales relacionadas a la Temperatura y 3 variables ambientales relacionadas a la Humedad. Los efectos de la estacionalidad para las cuatro colectas A (marzo), B (mayo), C (julio), y D (noviembre) en dos estaciones (Seca y Húmeda) también se incluyen en el modelo. Para Hymenoptera e Isptera II las variables estacionales son estación húmeda y estación seca.

Serie		Variables climáticas					Estacionalidad			
		Intercepto	Humedad relativa	Lluvia	Evapo.	Temp. mínima	Temp. máxima	Estación seca		Estación húmeda
							A	B	C	D
Coleoptera	Estima.	-14,45	-	0,13	1,00	0,68	-	0,85	-	-
	Efecto		-	13%	100%	68%	-	85%	-	-
	Signifi.		-	***	***	*	-	**	-	-
Hemiptera	Estima.	-4,66	-	0,01	0,03	-	0,29	-	-0,70	-
	Efecto		-	1%	3%	-	29%	-	-70%	-
	Signifi.		-	n.s.	n.s.	-	***	-	***	-
Lepidoptera	Estima.	1,45	-0,01	-	-0,24	-	0,22	-0,34	-	-
	Efecto		-1%	-	-24%	-	22%	-34%	-	-
	Signifi.		n.s.	-	*	-	**	*	-	-
Hymenoptera	Estima.	1,15	-	-	-0,08	0,16	-	0,89	-	-
	Efecto		-	-	-8%	16%	-	89%	-	-
	Signifi.		-	-	n.s.	*	-	***	-	-
	Estima.	14,45	-	-0,10	-	-	-0,30	1,30	-	-1,73

Formicidae	Efecto		-	-10%	-	-	-30%	-	30%	-	-173%
LT	Signifi.		-	**	-	-	n.s.	-	***	-	**
Isoptera LT I	Estima.	-11,76	-	-0,07	-0,49	-	0,56	-	-	-	-
	Efecto		-	-7%	-49%	-	56%	-	-	-	-
	Signifi.		-	*	**	-	***	-	-	-	-
Isoptera LT II	Estima.	-23,51	-	0,23	-	-	0,68	3,32			-
	Efecto		-	23%	-	-	68%	332%			-
	Signifi.		-	**	-	-	***	**			-

Significancia: *** = 99%, ** = 95%, * = 90%, n.s. = no significativa, - = no ingresa

Elaboración: Autor

En el modelo para la serie Coleoptera se incluyeron las variables lluvia, evapotranspiración, temperatura mínima y la variable dicotómica de la segunda recolección, resultado todas ser significativas del 10 %. Las precipitaciones tienen un efecto positivo, con cada aumento en una unidad de lluvia el número medio de abundancia aumenta un 13 %. La variable evapotranspiración también tiene un efecto positivo aumentando el promedio de abundancia en 100% al aumentar una unidad en su valor. La hipótesis se corrobora en los coleópteros ya que la temperatura mínima reportada si tiene un efecto y es positivo, es decir, cuando se reportaron temperaturas mínimas más altas la abundancia aumentó. La variable estacional incluida resultó ser significativa y positiva, es decir, en las recolecciones del cambio de estación seca a húmeda se recolecto mayor abundancia que en las demás.

Con respecto a los hemípteros las variables escogidas fueron lluvia, evapotranspiración, temperatura máxima y la recolección C; pero, evapotranspiración y lluvia resultaron no ser significativas. La variable temperatura máxima tiene un efecto positivo, cuando se da un aumento de un grado centígrado en el promedio de temperatura máxima mensual en el mes recolectado el valor medio de abundancia de hemípteros sube en un 29 %, por eso, los hemípteros resultan ser termofílicos, es decir, se sienten atraídos al calor. La variable cualitativa de la estación C resultó ser significativa con un efecto negativo, es decir, es probable encontrar menos abundancia de insectos cuando es el pico de estación húmeda.

En el tercer modelo referente a la serie Lepidoptera, se incluyeron las variables humedad, evapotranspiración, temperatura máxima y recolección B, resultado significativa la variable evapotranspiración con un efecto negativo hacia la abundancia de insectos. Al aumentar en una unidad el promedio de evapotranspiración bajará el promedio de abundancia en 24%. La variable temperatura máxima resultó ser significativa al 5 % y tener un efecto positivo, es decir, al aumentar la temperatura máxima de la isla la abundancia de lepidópteros aumentará en un 22 %, por lo cual corrobora la hipótesis planteada. Esta serie también resulta tener un efecto estacional, cuando la recolección se dio en el cambio de temporada seca a húmeda la abundancia es menor.

La evapotranspiración, la temperatura mínima y la variable de temporada seca resultaron ser las variables explicativas para el modelo de la serie Hymenoptera resultando significativas

las variables temperatura mínima y estación seca. Los resultados corroboran la hipótesis de que estas familias de insectos son termofílicas, al aumentar una unidad en la temperatura la abundancia promedio de Hymenoptera aumentará en un 16 %. Además, cuando la recolección se da en temporada seca su abundancia sube.

Asimismo, analizando las estimaciones para la serie Formicidae LT se reporta que las variables lluvia, temperatura máxima, recolección B y D son parte de este modelo, pero, la variable de temperatura no resulta significativa. Las precipitaciones resultan tener un efecto negativo hacia la abundancia de hormigas recolectadas con trampas de luz, esto corroborando lo descrito por Katz (2006) quien explica que, históricamente, las hormigas han sido fuente de información no verificada del inicio o fin de la lluvia ya que son animales que no conviven con ella. Las variables de temperatura no resultaron ser significativas para estas especies. La recolección del cambio de temporada seca a húmeda tiene un efecto positivo, es decir, en esta recolección se da mayor abundancia de insectos. Y cuando se da el cambio de temporada húmeda a seca se da menor abundancia de insectos.

En la serie Isoptera LT I se considera a la lluvia, evapotranspiración y temperatura máxima como variables explicativas y todas resultan ser significativas al 10 %. La lluvia tiene un efecto negativo hacia la abundancia de estas familias de insectos. Asimismo, la evapotranspiración tiene un efecto negativo, al aumentar un centímetro del promedio mensual de evapotranspiración el valor medio de abundancia bajará en un 49 %. Para esta serie se verifica la hipótesis ya que la temperatura máxima resultó ser significativa con un efecto positivo, más aun, analizando desde la parte cualitativa, ya que al aumentar una unidad en la temperatura máxima la abundancia media sube en un 56 por ciento. Hay que mencionar que esta serie no presenta variables estacionales significantes.

En la serie Isoptera LT II también verifica la hipótesis ya que el promedio de temperatura máxima mensual resulta ser significativa con un efecto positivo, es decir, ante un aumento en la temperatura máxima la abundancia de esta serie aumentará. Además, en este modelo se incluyeron las variables lluvia y recolección en temporada seca. Lluvia tiene un efecto positivo, es decir, cuando la suma mensual de precipitaciones sube la abundancia de isópteros II también, estos insectos muestran verse atraídos a salir más en climas lluviosos.

Finalmente, se presenta en la Tabla 4.7 el resumen de las estimaciones de las series anuales.

Tabla 4.7. Efecto de las variables climáticas en la abundancia de insectos series anuales

Serie		Intercepto	Humedad			Temp Máxima	Temp Mínima
			Relativa	Lluvia	Evap		
Formicidae	Estimación	7,11	-0,06	-	-	-	0,14
	Efecto		-6%	-	-	-	14%
	Significancia		*	-	-	-	n.s.
Isoptera	Estimación	7,32	-0,06	0,09	1,09	-	-0,07
	Efecto		-6%	9%	109%	-	-7%
	Significancia		*	***	**	-	n.s.

Significancia: *** = 99%, ** = 95%, * = 90%, n.s = no significativa, - = no ingresa

Elaboración: Autor

En la Tabla 4.7 se presenta el modelo resultante de las hormigas recolectadas en trampas Winkler, verificando que las variables utilizadas son humedad y temperatura máxima, pero, solo humedad resulta ser significativa. El efecto de la variable humedad es negativo, cuando existe mayor humedad la abundancia de hormigas decrece, además, dándole una magnitud a este cambio se tiene que por cada unidad que aumenta la humedad la media de abundancia de hormigas decrece en 6 %.

Adicionalmente, se puede observar las estimaciones hechas para la serie Isoptera, en el modelo se incluyó humedad, lluvia, evapotranspiración y temperatura mínima. La humedad tiene un efecto negativo en la abundancia de los isópteros, al contrario, lluvia y evapotranspiración tienen un efecto positivo. El cambio de en la suma mensual de precipitación en una unidad aumenta el valor medio de la abundancia en 9 %, también, un aumento en una unidad del promedio de evapotranspiración modificará 109 % el valor medio de la abundancia.

Cabe mencionar que en las dos series anuales no se verifica la hipótesis, ya que tanto las variables temperatura mínima como máxima no resultan significativas, es decir, no se puede asegurar que estos insectos se vean atraídos por el aumento de temperatura.

Capítulo 5

5. Discusión y Conclusiones

El presente trabajo analiza la dinámica temporal de la abundancia de diversas poblaciones de insectos. Para ello, se estudiaron nueve series de diferentes grupos taxonómicos recolectadas en la isla de Barro Colorado durante el periodo 2009-2019. Específicamente, en esta investigación se predice su comportamiento futuro y se expone su relación con variables climáticas y estacionales.

Este estudio se realizó en un ambiente tropical en donde, en relación a las zonas templadas del planeta, se tiene mayor diversidad de insectos. Sin embargo, se conoce mucho menos de las tendencias de largo plazo y futuras de insectos en zonas tropicales que en zonas templadas dado que la mayoría de estudios publicados viene de Estados Unidos o Europa (Colla & Packer, 2008). Hay que mencionar que los reportes de decrecimientos expuestos en otras partes del mundo se corroboran en algunas series en este estudio. Además, se establece la importancia de las variables climáticas como causa principal de esta dinámica.

5.1. Box-Jenkins

En este estudio se pronostica que una serie aumentaría su abundancia (e.g., una de las tres series de termitas: Isoptera LT II), otra disminuye (e.g., Hymenoptera), y varias se mantienen en el tiempo (e.g., Coleoptera, Hemiptera, Lepidoptera, Formicidae LT, Formicidae, y las restantes dos series de termitas: Isoptera LT I e Isoptera). La biología de cada uno de los taxa de insectos es importante y no se puede hacer generalizaciones que se apliquen a todos los insectos. Aunque la disminución de Hymenoptera corrobora, en parte, lo descrito sobre el Armagedón ecológico que puede estar existiendo en el planeta (Simon, 2018), esta además podría estar alineada a la sexta extinción masiva revisada por Salazar-Buenaño & Donoso (2019). Sin embargo, en esta investigación se ha encontrado que la mayoría de taxa se

mantienen estables en el tiempo y por lo tanto las poblaciones de insectos tropicales podrían tener mayor resiliencia a los efectos del hombre sobre la naturaleza. El objetivo de Box–Jenkins es encontrar patrones temporales para pronosticar el futuro (Astuti & Jamaludin, 2018), por eso no permite distinguir el grado de cambio en la abundancia de insectos. Sin embargo, Box –Jenkins es un primer acercamiento al estudio de series de tiempo con las que se cuenta, especialmente para ambientes tropicales. Por lo tanto, es difícil evaluar y establecer buenas comparaciones.

Se encontró que la serie Hymenoptera tiene pronosticado bajar su abundancia para el próximo año de estudio. Siendo este grupo, quizás, de los insectos más beneficiosos ya que cumplen funciones de control de plagas y las abejas son el grupo de polinizadores más importante (Mayhew & Mayhew, 2007). Fortel et al. (2014) encontraron disminuciones de abejas silvestres en Francia. Además, según Hines & Hendrix (2005) la razón del decrecimiento de abejorros es el aumento de la cantidad de tierra convertida para uso agrícola. Algo que notar, es que a diferencia de los estudios anteriores este estudio se realizó en una reserva protegida y por eso la intervención humana no tendría influencia en la disminución de Hymenoptera.

Al contrario de Hymenoptera, se encontró que los isópteros tienen diferentes comportamientos (dos series se mantienen y una crece). En general, las diferencias en las tres series de isópteros se deben al tipo de trampas utilizadas y diferencias en las especies que caen en estas trampas. Las termitas pueden destruir cultivos, bosques o estructuras de madera, por lo cual, podrían causar pérdidas económicas (Vasconcellos et al., 2007). Los resultados contradicen el estudio de Black (2018) que menciona que la abundancia de termitas estaría decreciendo en Nigeria. Se debe notar que las kalotermitas (Isoptera LT II) viven exclusivamente dentro de excavaciones de madera, por eso, tienen diferencias en su comportamiento con respecto a las termitas y rhynotermitas (Isoptera LT I) (Arnett Jr., 2000). La mayor abundancia de termitas en la estación seca de Barro Colorado podría deberse a que es en esta estación en la que se encuentra la mayor cantidad de madera, ya que, la mayoría de árboles muere en la época seca (Donoso et al., 2010).

También, se encontró que la serie Coleoptera pronostica una tendencia constante en el tiempo. Este grupo de insectos pueden inducir directa o indirectamente elevadas pérdidas en

los recursos humanos agrícolas y forestales, como cosechas, pastos, maderas y productos almacenados (Lawrence & Britton, 1994). Al contrario, las especies de escarabajos del estiércol pueden ayudar a mitigar el calentamiento global al contribuir al intenso ciclo de nutrientes y la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero causadas por la ganadería (Maldaner et al., 2021). Melnychuk et al. (2003) mencionaron que no existen diferencias significativas en la abundancia de escarabajos en Canadá entre 1994 y 1996. Por el contrario, Honek et al. (2017) encontraron en su estudio de Europa entre 2012 y 2015 que si existe una disminución en la abundancia de coleópteros pero se da por la influencia del ser humano, específicamente, la implementación de agricultura intensiva.

5.2. GLM

Efectos de las variables ambientales en la abundancia de insectos a lo largo del tiempo

Se encontró que todas las series temporales tienen influencia de variables climáticas en su abundancia, lo cual, ya ha sido encontrado ampliamente en estudios previos (Lister & Garcia, 2018a; Stemkovski et al., 2020; Wright, 1991). El efecto de las variables climáticas resulto cambiar según la serie estudiada, por ejemplo, existieron taxa que tienen atracción a la lluvia (Coleoptera, Isoptera LT II) y otras que no (Hymenoptera, Formicidae).

La serie Coleoptera resultó tener influencia positiva de las variables temperatura y humedad. De hecho, estos resultados coinciden con lo descrito por Olfert & Weiss (2006) quienes encontraron que la abundancia de coleópteros en Canadá sube cuando hay más humedad. También, Rainio & Niemelä (2003) encontraron que existe una relación positiva con las variables de temperatura. El resultado de este estudio es contrario al de Kotze et al. (2003) quienes explican que el calentamiento global (un aumento en la temperatura) inducido por el hombre es una razón fundamental de la disminución en la abundancia de insectos. Por otro lado, Honek et al. (2017) no encontraron relación directa del cambio climático en la abundancia de mariquitas (un grupo de Coleoptera) y explican que, por el momento, el cambio climático no tiene efectos importantes en la abundancia de esta especie.

Sobre la abundancia de hormigas recolectadas por trampas de luz la temperatura tiene un efecto negativo. Las hormigas tienen impacto en el ecosistema teniendo entre sus funciones el control biológico (Katz, 2006). Los resultados se suman a lo expuesto por Andrew et al. (2013) quienes explican que el aumento de la temperatura puede resultar en una reducción inmediata en la eficiencia de búsqueda de alimento. Si la cantidad de comida capturada baja, las colonias de hormigas podrían estar en mayor riesgo de morir y, por lo tanto, su abundancia tendería a bajar. Además, Tiede et al. (2017) encontraron en Ecuador que las hormigas reaccionan de manera negativa ante cambios del clima y, este cambio, es inmediato debido a su sensibilidad. Al contrario, Al-Khalifa et al. (2015) explican en su estudio de Arabia Saudita que la temperatura tiene un efecto positivo en la abundancia de insectos. Los cambios en la temperatura tienen un efecto diferente a las hormigas y depende de las características del ecosistema, en resumen, la abundancia de hormigas cambia por cualquier alteración de la temperatura (Gibb et al., 2015).

La abundancia de mariposas tuvo una influencia negativa de la lluvia, es decir, se beneficiaron por las temporadas menos lluviosas. Las larvas de mariposas pueden destruir hojas, brotes, flores, frutos, tallos, raíces y semillas de las plantas cultivadas, reduciendo los rendimientos y provocando pérdidas económicas (Castresana & Puhl, 2017). El estudio de Hufnagel & Kocsis (2011) señalan para mariposas y polillas de Europa que las mariposas fueron menos atraídas a temporadas lluviosas. También, Checa et al. (2013) mencionan en su estudio del Yasuní que la lluvia tiene un efecto negativo en la abundancia de insectos, pero además, explican que la temperatura es el factor determinante más significativo de la abundancia de mariposas. De hecho, Wilson & Maclean (2010) explican que las mariposas son muy sensibles a cualquier cambio en su ecosistema. Esta puede ser la razón por la que la influencia de la humedad en la abundancia de mariposas es negativa (contrario a casi todas las otras series).

Efectos de la estacionalidad en la abundancia de insectos a lo largo del tiempo

Aunque la estacionalidad en los trópicos suele ser menos pronunciada que en zonas templadas (Maicher et al., 2018), para este estudio resultó ser un factor de cambio significativo. Los resultados sugieren que las variables estacionales en los modelos GLM son

significativas, es decir, la abundancia de especies puede cambiar dependiendo la estación en la que se realice la recolección. Esto quizás se debe a que el clima en Panamá es estacional con una estación seca marcada de diciembre a abril (Donoso et al., 2010). Según Schowalter et al. (2021) el efecto estacional puede llegar a modificar el hábitat de las especies y con ello su comportamiento. Al contrario, Pinheiro et al. (2002) sugieren en su estudio de Brasil que los efectos estacionales son poco claros o inexistentes.

Se encontró que Isoptera LT II tiene mayor abundancia en la estación seca. Esto es diferente a lo reportado por Black (2018) quien encontró que la abundancia de termitas en la estación húmeda fue más alta que en la estación seca en las sabanas de Nigeria. Estas diferencias se las pueden explicar utilizando las características geográficas y biológicas de los diferentes ecosistemas. Como explicado anteriormente, la mayor abundancia de termitas en la estación seca de Barro Colorado podría deberse a que es en esta estación en la que se encuentra la mayor cantidad de madera, ya que, la mayoría de árboles muere en la época seca (Donoso et al., 2010).

En este estudio se encontraron menos mariposas en la época seca que en la época húmeda. Estos resultados son similares a los de otros estudios. Por ejemplo, Castro & Espinosa (2015) mencionan que en las épocas de lluvia se encuentran mayor abundancia de mariposas en su estudio en Loja, Ecuador. También, en las selvas tropicales de Camerún se encontraron menos mariposas en las épocas secas (Maicher et al., 2018). En general, en ambientes tropicales se corrobora que las mariposas tienen a subir su abundancia cuando sube la humedad.

Es así que, la hipótesis planteada de que las variables climáticas influyen en la abundancia de insectos se cumple para todas las series y el clima resulta ser una causa importante del cambio en la abundancia de insectos de Panamá. Cabe mencionar que los insectos son muy sensibles ya que no son capaces de producir su propio calor y por eso dependen del clima externo (Lawrence & Britton, 1994). Además, Baudier et al. (2015) explican que el tamaño corporal y el hábitat específico de cada especie también pueden determinar la dinámica de hormigas ante un cambio climático. Por eso, es indispensable encontrar relaciones a largo plazo de sus características morfológicas y la relación de esta con el ambiente.

También, Gibb et al. (2018) mencionan en su estudio entre 1996 y 2012 que todos los animales pueden ser vulnerables al cambio global, sobre todo por la alteración del hábitat que este cambio puede producir. De hecho, Wilson & Fox, (2021) mencionan que los insectos explican los efectos ecológicos del cambio global y mejoran el análisis de la conservación del medio ambiente. Según Rippel et al. (2021) las comunidades de insectos están siendo amenazadas por la actividad humana como por ejemplo las pérdidas de hábitat en sitios costaneros (aumento del nivel del mar). También, la pérdida de hábitat ocasionada por construcción de vías y ciudades restringen el hábitat de los insectos e impiden trasladarse a otros ante el cambio del clima (migración por temporadas)(Gimeno, 2012). Cabe mencionar que la influencia del ser humano en procesos como el cambio climático no pudo ser medida de manera directa en este estudio, pero el cambio climático resulta ser una consecuencia de ciertas acciones humanas (Toranzo, 2016), por lo cual, la intervención humana si podría catalogarse como una causa de la dinámica de insectos, pero de manera indirecta.

Capítulo 6

6. Recomendaciones

Dado que el calentamiento del planeta ha sido descrito como uno de los principales motores de la extinción de especies (Stork, 2009), resulta indispensable mostrar evidencia de la influencia del clima en la dinámica de insectos a largo plazo, teniendo mayores periodos de estudio para que se sigan cubriendo más enfoques y escenarios. De hecho, en este estudio fue imposible determinar el efecto del fenómeno del Niño, una oscilación que sucede alrededor de cada cinco años y que para Panamá trae sequía.

Además, debido al comportamiento diferente de cada taxa con el clima, resulta indispensable estudiar a la mayor cantidad de especies ya que pueden dar diferentes respuestas en su comportamiento. Hasta el momento, las mariposas y hormigas son más estudiadas (Alberto Castro & Espinosa, 2016), pero existen otras taxa que también cumplen funciones importantes para el ecosistema que han tenido menor interés por parte de los científicos. Por ejemplo, abejas y moscas nativas son los principales polinizadores en el bosque, pero muy pocas series de tiempo existen sobre ellas.

Sin importar el taxa, Schowalter et al. (2021) encontraron que la abundancia de insectos se ve influenciada solo por cambios extremos en el clima. Al contrario, Lister & Garcia (2018) explican que cualquier cambio o modificación del clima puede afectar el ecosistema y los insectos son muy sensibles a este tipo de cambios. Los resultados de este estudio recomiendan que los cambios en el clima pueden modificar la abundancia de insectos y no son necesarios cambios extremos para que esto se dé.

Según Halloy (2012) es preocupante la tendencia general de calentamiento global y sus consecuencias a la integridad de los ecosistemas, además, según el autor el aumento de la temperatura se acentuado en los últimos 20 años. En los trópicos se prevé que ocurran los cambios climáticos antes que en otras partes del mundo (Mora et al., 2011), por eso, se

debería estudiar a fondo estas regiones y aplicarlos a otros ecosistemas como bosques tropicales bajos inalterados (Yasuní) o bosques tropicales de altura.

Sin bien, este trabajo resulta ser uno de los primeros que estudia los trópicos con series de tiempo y ya brinda respuestas, una de las principales limitaciones, según lo mencionado en el Capítulo 3, es que el periodo de tiempo es reducido (en comparación al recomendado). Esto corrobora lo expuesto por algunos autores (Fernandez, 2019; Jordan et al., 2021; Rippel et al., 2021) quienes mencionan que es necesario incrementar estos periodos para tener estudios con mayor robustez.

En general, no se evalúa el efecto del cambio climático que podría resultar en la pérdida de las funciones ecológicas, económicas y sociales (Briggs, 2017) realizadas por los insectos. Por ejemplo, Jordan et al. (2021) mencionan que servicio de polinización mediada por insectos socavan la diversidad biológica y la función de los ecosistemas, la nutrición humana y el bienestar económico. De hecho, existen impactos directos del cambio climático en las vidas de personas que económicamente dependen de los bienes y servicios que ofrecen los ecosistemas (Halloy, 2012) y de manera particular, los insectos. Uno de cada tres puestos de empleo del mundo dependen de la agricultura (Salazar-Buenaño & Donoso, 2019). También, las funciones de los insectos en Estados Unidos al año generan más de la mitad del producto interno bruto del Ecuador (Losey & Vaughan, 2006). Es decir, la reducción de la abundancia de insectos, y con eso la pérdida de sus funciones, puede generar pérdidas económicas.

Bibliografía

- Adanacioglu, H., & Yercanm, M. (2012). An analysis of tomato prices at wholesale level in Turkey: an application of SARIMA model. *ISSN*. www.custoseagronegocioonline.com.br
- Al-Khalifa, M. S., Mashaly, A. M. A., Siddiqui, M. I., & Al-Mekhlafi, F. A. (2015). Samsun ant, *Brachyponera sennaarensis* (Formicidae: Ponerinae): Distribution and abundance in Saudi Arabia. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 22(5), 575–579. <https://doi.org/10.1016/J.SJBS.2015.05.011>
- Alcamo, J., Vuuren van, D., & Ringer, C. (2005). Ecosystems and Human Well-Being: Scenarios. *Island Press*, 18(2), 54. <http://www.bioquest.org/wp-content/blogs.dir/files/2009/06/ecosystems-and-health.pdf>
- Andrew, N. R., Hart, R. A., Jung, M. P., Hemmings, Z., & Terblanche, J. S. (2013). Can temperate insects take the heat? A case study of the physiological and behavioural responses in a common ant, *Iridomyrmex purpureus* (Formicidae), with potential climate change. *Journal of Insect Physiology*, 59(9), 870–880. <https://doi.org/10.1016/J.JINSPHYS.2013.06.003>
- Añino, Y. J., Cambra, R. A., Windsor, D. M., Williams, K. A., Bartholomay, P. R., Sánchez, V., & Quintero, D. (2020). Seasonal and annual abundance of ephuta wasp (Hymenoptera: Mutillidae) in Panama. *Revista de Biología Tropical*, 68(2), 573–579. <https://doi.org/10.15517/RBT.V68I2.38876>
- Arellano, M., David Clemente López Pérez, & Juan Carlos Salinas López. (2018). *Del Modelo Arima vs Markoviano En La Determinación De Pronósticos De Caudales*. http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/ccl/guide/documents/wmo_100_es.pdf
- Arnett Jr., R. H. (2000). American insects: a handbook of the insects of America north of Mexico. Second edition. *American Insects: A Handbook of the Insects of America North of Mexico. Second Edition.*, i–xvii, 1–1003.
- Arroyo, M., & Viñuela, E. (1991). Introducción a la entomología. *Mundi-Prensa*, 13–129.
- Astuti, S. W., & Jamaludin. (2018). Forecasting Surabaya - Jakarta Train Passengers with SARIMA model. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 407(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/407/1/012105>
- Barnosky, A. D., Matzke, N., Tomiya, S., Wogan, G. O. U., Swartz, B., Quental, T. B., Marshall, C., McGuire, J. L., Lindsey, E. L., Maguire, K. C., Mersey, B., & Ferrer, E. A. (2011). Has the Earth's sixth mass extinction already arrived? *Nature*, 471(7336), 51–57. <https://doi.org/10.1038/nature09678>
- Baudier, K. M., Mudd, A. E., Erickson, S. C., & O'Donnell, S. (2015). Microhabitat and body size effects on heat tolerance: implications for responses to climate change (army

- ants: Formicidae, Ecitoninae). *Journal of Animal Ecology*, 84(5), 1322–1330. <https://doi.org/10.1111/1365-2656.12388>
- Baxter-Gilbert, J. H., Riley, J. L., Neufeld, C. J. H., Litzgus, J. D., & Lesbarrères, D. (2015). Road mortality potentially responsible for billions of pollinating insect deaths annually. *Journal of Insect Conservation*, 19(5), 1029–1035. <https://doi.org/10.1007/s10841-015-9808-z>
- Black, H. I. J. (2018). *ABUNDANCE AND DISTRIBUTION OF MICROTREMES (ISOPTERA: TERMITIDAE: MACROTREMIDAE) IN CULTIVATED AND UNCULTIVATED AREAS AT MOKWA IN THE SOUTHERN GUINEA SAVANNA VEGETATION ZONE OF NIGERIA*. <https://qmro.qmul.ac.uk/xmlui/handle/123456789/52083>
- Bolam, F., Mair, L., Angelico, M., Brooks, T., Burgman, M., Hermes, C., Hoffmann, M., Martin, R., McGowan, P., Rodrigues, A., Rondinini, C., Wheatley, H., Bedolla-Guzmán, Y., Calzada, J., Child, M., Cranswick, P., Dickman, C., Fessl, B., Fisher, D., ... Butchart, S. (2020). *How many bird and mammal extinctions has recent conservation action prevented? August*, 1–11. <https://doi.org/10.1101/2020.02.11.943902>
- Bowie, M. H., Shields, M. W., He, S., Ross, J. G., Cruickshank, R. H., & Hodge, S. (2019). A survey of ground beetles (Coleoptera: Carabidae) in Ahuriri Scenic Reserve, Banks Peninsula, and comparisons with a previous survey performed 30 years earlier. *New Zealand Journal of Zoology*, 46(4), 285–300. <https://doi.org/10.1080/03014223.2018.1546196>
- Briggs, J. C. (2017). Emergence of a sixth mass extinction? *Biological Journal of the Linnean Society*, 122(2), 243–248. <https://doi.org/10.1093/biolinnean/blx063>
- Brooks, D. R., Bajer, J. E., Clark, S. J., Monteith, D. T., Andrews, C., Corbett, S. J., Beaumont, D. A., & Chapman, J. W. (2012). *Large carabid beetle declines in a United Kingdom monitoring network increases evidence for a widespread loss in insect biodiversity*. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2012.02194.x>
- Bryans, A., Cornish, F., & McIntosh, J. (2009). The potential of ecological theory for building an integrated framework to develop the public health contribution of health visiting. *Health and Social Care in the Community*, 17(6), 564–572. <https://doi.org/10.1111/J.1365-2524.2009.00856.X>
- Byers, J. E., Reichard, S., Randall, J. M., Parker, I. M., Smith, C. S., Lonsdale, W. M., Atkinson, I. A. E., Seastedt, T. R., Williamson, M., Chornesky, E., & Hayes, D. (2002). Directing Research to Reduce the Impacts of Nonindigenous Species. *Conservation Biology*, 16(3), 630–640. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.2002.01057.x>
- Castresana, J., & Puhl, L. (2017). *Comparative study among a variety of solar-powered LED traps to capture tomato leafminers Tuta absoluta adults by mass trapping in tomato greenhouses in the Province of Entre Ríos, Argentina*. 35. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292016005000017>

- Castro, A., & Espinosa, C. I. (2015). Seasonal Diversity of Butterflies and Its Relationship with Woody-Plant Resources Availability in an Ecuadorian Tropical Dry Forest: *Https://Doi.Org/10.1177/194008291500800205*, 8(2), 333–351. <https://doi.org/10.1177/194008291500800205>
- Castro, Alberto, & Espinosa, C. I. (2016). Dinámica estacional de invertebrados y su relación con variables climáticas en un gradiente altitudinal de matorral seco tropical. *Ecosistemas*, 25(2), 35–45. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2016.25-2.05>
- Ceballos, G., Ehrlich, P. R., Barnosky, A. D., García, A., Pringle, R. M., & Palmer, T. M. (2015). Accelerated modern human-induced species losses: Entering the sixth mass extinction. *Science Advances*, 1. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1400253>
- Chao, A., Kubota, Y., Zelený, D., Chiu, C. H., Li, C. F., Kusumoto, B., Yasuhara, M., Thorn, S., Wei, C. L., Costello, M. J., & Colwell, R. K. (2020). Quantifying sample completeness and comparing diversities among assemblages. *Ecological Research*, 35(2), 292–314. <https://doi.org/10.1111/1440-1703.12102>
- Chauvin, R. (1968). El mundo de los insectos. *Ediciones Guadarrama ISBN*.
- Checa, M. F., Barragán, A., Rodríguez, J., & Christman, M. (2013). Temporal abundance patterns of butterfly communities (Lepidoptera: Nymphalidae) in the Ecuadorian Amazonia and their relationship with climate. *Https://Doi.Org/10.1080/00379271.2009.10697630*, 45(4), 470–486. <https://doi.org/10.1080/00379271.2009.10697630>
- Clausnitzer, V., Kalkman, V. J., Ram, M., Collen, B., Baillie, J. E. M., Bedjanič, M., Darwall, W. R. T., Dijkstra, K. D. B., Dow, R., Hawking, J., Karube, H., Malikova, E., Paulson, D., Schütte, K., Suhling, F., Villanueva, R. J., von Ellenrieder, N., & Wilson, K. (2009). Odonata enter the biodiversity crisis debate: The first global assessment of an insect group. *Biological Conservation*, 142(8), 1864–1869. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2009.03.028>
- Cohen, J. (1988). Statistical power analysis for the behavioral sciences. *Hillsdale*.
- Colla, S. R., & Packer, L. (2008). Evidence for decline in eastern North American bumblebees (Hymenoptera: Apidae), with special focus on *Bombus affinis* Cresson. *Biodiversity and Conservation*, 17(6), 1379–1391. <https://doi.org/10.1007/s10531-008-9340-5>
- Costello, M. J. (2015). Biodiversity: The known, unknown, and rates of extinction. In *Current Biology* (Vol. 25, Issue 9, pp. R368–R371). Cell Press. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2015.03.051>
- Critchfield, H. (1983). Criteria for classification of major climatic types in modified Köppen system. *General Climatology*.
- Crossley, M. S., Meier, A. R., Baldwin, E. M., Berry, L. L., Crenshaw, L. C., Hartman, G. L., Lagos-Kutz, D., Nichols, D. H., Patel, K., Varriano, S., Snyder, W. E., & Moran, M.

- D. (2020). No net insect abundance and diversity declines across US Long Term Ecological Research sites. *Nature Ecology and Evolution*, *Table 1*. <https://doi.org/10.1038/s41559-020-1269-4>
- De Vos, J. M., Joppa, L. N., Gittleman, J. L., Stephens, P. R., & Pimm, S. L. (2015). Estimating the normal background rate of species extinction. *Conservation Biology*, *29*(2), 452–462. <https://doi.org/10.1111/cobi.12380>
- Donoso, D. A., Johnston, M. K., & Kaspari, M. (2010). Trees as templates for tropical litter arthropod diversity. *Oecologia* *2010* *164:1*, *164*(1), 201–211. <https://doi.org/10.1007/S00442-010-1607-3>
- Duarte, H., & Zenner, I. (2009). Temperatura Effect on the development of *Eriopis connexa*. *Temperatura y Desarrollo*.
- Farsi, M., Hosahalli, D., Manjunatha, B. R., Gad, I., Atlam, E. S., Ahmed, A., Elmarhomy, G., Elmarhoumy, M., & Ghoneim, O. A. (2021). Parallel genetic algorithms for optimizing the SARIMA model for better forecasting of the NCDC weather data. *Alexandria Engineering Journal*, *60*(1), 1299–1316. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.10.052>
- Fernandez, A. (2019). Los insectos, seres diminutos con una importancia inmensa. *Nature Ecology and Evolution*.
- Fortel, L., Henry, M., Guilbaud, L., Guirao, A. L., Kuhlmann, M., Mouret, H., Rollin, O., & Vaissière, B. E. (2014). Decreasing Abundance, Increasing Diversity and Changing Structure of the Wild Bee Community (Hymenoptera: Anthophila) along an Urbanization Gradient. *PLOS ONE*, *9*(8), e104679. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0104679>
- Fox, J. (1997). Applied regression Analysis, linear models and related methods. *Thousand Oaks*.
- Garcia, J. (2000). La rebelión de los astrónomos. Copérnico y Kepler. *Revista de La Sociedad Española de La Historia*.
- Gattinoni, L., Lugli, E., Ji, Y., Pos, Z., Paulos, C. M., Quigley, M. F., Almeida, J. R., Gostick, E., Yu, Z., Carpenito, C., Wang, E., Douek, D. C., Price, D. A., June, C. H., Marincola, F. M., Roederer, M., & Restifo, N. P. (2011). A human memory T cell subset with stem cell-like properties. *Nature Medicine*, *17*(10), 1290–1297. <https://doi.org/10.1038/nm.2446>
- Gibb, H., Sanders, N. J., Dunn, R. R., Arnan, X., Vasconcelos, H. L., Donoso, D. A., Andersen, A. N., Silva, R. R., Bishop, T. R., Gomez, C., Grossman, B. F., Yusah, K. M., Luke, S. H., Pacheco, R., Pearce-Duvet, J., Retana, J., Tista, M., & Parr, C. L. (2018). Habitat disturbance selects against both small and large species across varying climates. *Ecography*, *41*(7), 1184–1193. <https://doi.org/10.1111/ECOG.03244>
- Gibb, Heloise, Sanders, N. J., Dunn, R. R., Watson, S., Photakis, M., Abril, S., Andersen, A.

- N., Angulo, E., Armbrecht, I., Arnan, X., Baccaro, F. B., Bishop, T. R., Boulay, R., Castracani, C., Toro, I. Del, Delsinne, T., Diaz, M., Donoso, D. A., Enríquez, M. L., ... Parr, C. L. (2015). Climate mediates the effects of disturbance on ant assemblage structure. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 282(1808). <https://doi.org/10.1098/RSPB.2015.0418>
- Gil, A., & Olcina, J. (2017). Tratado de climatología. *Universidad de Alicante*.
- Gimeno, E. (2012). *Migraciones, comunicación y neuromagnetismo animal*. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/32964>
- Gómez Gallego, L. J. (2014). Consecuencias de la multicolinealidad. *Economía Política*.
- Gujarati, D. N., & Porter, D. C. (2007). *Econometría*.
- Gullan, P., & Cranston, P. (2014). *Los insectos: un esbozo de entomología*. https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=u1w7BAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR9&dq=gullan+2014&ots=InZk8tt-ap&sig=EkMVfrJb6bt5r_dOL5cpBpVwXVc
- Hallmann, C. A., Sorg, M., Jongejans, E., Siepel, H., Hofland, N., Schwan, H., Stenmans, W., Müller, A., Sumser, H., Hörren, T., Goulson, D., & De Kroon, H. (2017). More than 75 percent decline over 27 years in total flying insect biomass in protected areas. *PLoS ONE*, 12(10). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0185809>
- Halloy, S. (2012). *Consecuencias del cambio climático en los ecosistemas y servicios ecosistémicos de los Andes Tropicales*.
- Haye, D. (2020). *Living Planet Report 2020 - Bending the curve of biodiversity loss*.
- Hill, D. S. (1997). THE ECONOMIC IMPORTANCE OF INSECTS. *Animal Resources Program*.
- Hines, H. M., & Hendrix, S. D. (2005). Bumble Bee (Hymenoptera: Apidae) Diversity and Abundance in Tallgrass Prairie Patches: Effects of Local and Landscape Floral Resources. *Environmental Entomology*, 34(6), 1477–1484. <https://doi.org/10.1603/0046-225X-34.6.1477>
- Hodge, R. D., Bakken, T. E., Miller, J. A., Smith, K. A., Barkan, E. R., Graybuck, L. T., Close, J. L., Long, B., Johansen, N., Penn, O., Yao, Z., Eggermont, J., Höllt, T., Levi, B. P., Shehata, S. I., Aevermann, B., Beller, A., Bertagnolli, D., Brouner, K., ... Lein, E. S. (2019). Conserved cell types with divergent features in human versus mouse cortex. *Nature*, 573(7772), 61–68. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1506-7>
- Honek, A., Dixon, A. F., Soares, A. O., Skuhrovec, J., & Martinkova, Z. (2017). Spatial and temporal changes in the abundance and composition of ladybird (Coleoptera: Coccinellidae) communities. *Current Opinion in Insect Science*, 20, 61–67. <https://doi.org/10.1016/J.COIS.2017.04.001>
- Hotez, P. J. (2007). Control of Neglected Tropical Diseases. *The New England Journal of Medicine*, 357(10), 1018–1027. <https://doi.org/10.1056/NEJMra064142>

- Howard, K. J., & Thorne, B. L. (2010). Eusocial Evolution in Termites and Hymenoptera BT - Encyclopedia of Geropsychology. *Encyclopedia of Geropsychology, Chapter 5*, 97–132. http://www.springerlink.com/index/10.1007/978-90-481-3977-4_5
- Hufnagel, L., & Kocsis, M. (2011). *Impacts of climate change on Lepidoptera species and communities*. <http://www.ecology.uni-corvinus.hu>
- Jeshua Sánchez-Reyes, U., Niño-Maldonado, S., Barrientos-Lozano, L., Fátima, Y., & Sandoval-Becerra, M. (2016). *INFLUENCIA DEL CLIMA EN LA DISTRIBUCIÓN DE CHRYSOMELIDAE (COLEOPTERA) EN EL CAÑÓN DE LA PEREGRINA, TAMAULIPAS, MÉXICO*.
- Jordan, A., Patch, H. M., Grozinger, C. M., & Khanna, V. (2021). Economic Dependence and Vulnerability of United States Agricultural Sector on Insect-Mediated Pollination Service. *Environmental Science & Technology*, 55(4), 2243–2253. <https://doi.org/10.1021/ACS.EST.0C04786>
- José Verdú, & Eduardo Galante. (2009). *Atlas de los invertebrados amenazados de España*.
- Katz, E. (2006). Las hormigas, el maíz y la lluvia. *Anales de Antropología*, 39(2). <http://revistas.unam.mx/index.php/antropologia/article/view/9972>
- Koppen, W. (1900). *Versuch einer Klassifikation der Klimate, vorzugsweise nach ihren Beziehungen zur Pflanzenwelt*.
- Kotze, D. J., Niemelä, J., O'Hara, R. B., & Turin, H. (2003). Testing abundance-range size relationships in European carabid beetles (Coleoptera, Carabidae). *Ecography*, 26(5), 553–566. <https://doi.org/10.1034/J.1600-0587.2003.03488.X>
- Lamarre, G. P. A., Fayle, T. M., Segar, S. T., Laird-Hopkins, B. C., Nakamura, A., Souto-Vilarós, D., Watanabe, S., & Basset, Y. (2020). Monitoring tropical insects in the 21st century. In *Advances in Ecological Research* (1st ed., Vol. 62). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/bs.aecr.2020.01.004>
- Larsen, T. H., & Forsyth, A. (2005). Trap spacing and transect design for dung beetle biodiversity studies. *Biotropica*, 37(2), 322–325. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2005.00042.x>
- Lawrence, J. F. (John F., & Britton, E. B. (Everard B. (1994). Australian beetles. *Melbourne University Press*, 192, 192.
- Leather, S. R. (2018). “Ecological Armageddon”—more evidence for the drastic decline in insect numbers. *Ann Appl Biol*, 172, 1–3. <https://doi.org/10.1111/aab.12410>
- Lister, B. C., & Garcia, A. (2018a). Climate-driven declines in arthropod abundance restructure a rainforest food web. In *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* (Vol. 115, Issue 44, pp. E10397–E10406). <https://doi.org/10.1073/pnas.1722477115>
- Lister, B. C., & Garcia, A. (2018b). Climate-driven declines in arthropod abundance

- restructure a rainforest food web. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 115(44), E10397–E10406. <https://doi.org/10.1073/pnas.1722477115>
- Losey, J. E., & Vaughan, M. (2006). The economic value of ecological services provided by insects. *BioScience*, 56(4), 311–323. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2006\)56\[311:TEVOES\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2006)56[311:TEVOES]2.0.CO;2)
- Maicher, V., Sáfián, S., Murkwe, M., Przybyłowicz, Ł., Janeček, Š., Fokam, E. B., Pyrcz, T., & Tropek, R. (2018). Flying between raindrops: Strong seasonal turnover of several Lepidoptera groups in lowland rainforests of Mount Cameroon. *Ecology and Evolution*, 8(24), 12761–12772. <https://doi.org/10.1002/ECE3.4704>
- Maldaner, M. E., Sobral-Souza, T., Prasniewski, V. M., & Vaz-de-Mello, F. Z. (2021). Effects of Climate Change on the Distribution of Key Native Dung Beetles in South American Grasslands. *Agronomy 2021, Vol. 11, Page 2033*, 11(10), 2033. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY11102033>
- Martin, J., & Webb, M. (1999). *Hemiptera...It's a Bug's Life*. Natural History Museum. http://www.nhm.ac.uk/resources-rx/files/26feat_its_a_bugs_life-3013.pdf
- Mayhew, P. J., & Mayhew, P. J. (2007). Why are there so many insect species? Perspectives from fossils and phylogenies. *Biological Reviews*, 82(3), 425–454. <https://doi.org/10.1111/j.1469-185X.2007.00018.x>
- Melnychuk, N. A., Olfert, O., Youngs, B., & Gillott, C. (2003). Abundance and diversity of Carabidae (Coleoptera) in different farming systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 95(1), 69–72. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(02\)00119-6](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(02)00119-6)
- Mora, C., Tittensor, D. P., Adl, S., Simpson, A. G. B., & Worm, B. (2011). How many species are there on earth and in the ocean? *PLoS Biology*, 9(8), 1–8. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1001127>
- Morón, M. A., & Terrón-S, R. A. (1984). DISTRIBUCION ALTITUDINAL Y ESTACIONAL DE LOS INSECTOS NECROFILOS EN LA SIERRA NORTE DE HIDALGO, MEXICO. *ACTA ZOOLOGICA MEXICANA (N.S.)*, 3, 1–47. <https://doi.org/10.21829/AZM.1984.132052>
- Murphy, S. M., Richards, L. A., & Wimp, G. M. (2020). Editorial: Arthropod Interactions and Responses to Disturbance in a Changing World. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 8(April), 1–5. <https://doi.org/10.3389/fevo.2020.00093>
- Nelder, J., & Wedderburn, R. (1972). Generalized Linear Models. *Journal of the Royal Statistical Society*, 135, 370–384.
- Olfert, O., & Weiss, R. M. (2006). Impact of climate change on potential distributions and relative abundances of *Oulema melanopus*, *Meligethes viridescens* and *Ceutorhynchus obstrictus* in Canada. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 113(1–4), 295–301. <https://doi.org/10.1016/J.AGEE.2005.10.017>

- Oliver, J. (2015). *The Encyclopedia of World Climatology*. ISBN, 978.
- Payne, J. L., Bush, A. M., Heim, N. A., Knope, M. L., & Mccauley, D. J. (2016). Ecological selectivity of the emerging mass extinction in the oceans. *Ciencias*, 353. <https://doi.org/10.1126/science.aaf2416>
- Pinheiro, F., Diniz, I. R., Coelho, D., & Bandeira, M. P. S. (2002). Seasonal pattern of insect abundance in the Brazilian cerrado. *Austral Ecology*, 27(2), 132–136. <https://doi.org/10.1046/J.1442-9993.2002.01165.X>
- Preston, F. W. (1948). The Commonness, And Rarity, of Species. *Ecology*, 29(3), 254–283. <https://doi.org/10.2307/1930989>
- Rainio, J., & Niemelä, J. (2003). Ground beetles (Coleoptera: Carabidae) as bioindicators. *Biodiversity & Conservation* 2003 12:3, 12(3), 487–506. <https://doi.org/10.1023/A:1022412617568>
- Rippel, T. M., Tomasula, J., Murphy, S. M., & Wimp, G. M. (2021). Global change in marine coastal habitats impacts insect populations and communities. *Current Opinion in Insect Science*, 47, 1–6. <https://doi.org/10.1016/J.COIS.2021.02.010>
- Salazar-Buenaño, F., & Donoso, D. (2019). Declinación masiva de insectos: ¿Se acerca el Armagedón? *Curiosidades Cientificas*, 21(2006), 44–46.
- Sánchez-Bayo, F., & Wyckhuys, K. A. G. (2019). Worldwide decline of the entomofauna: A review of its drivers. In *Biological Conservation* (Vol. 232, pp. 8–27). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.01.020>
- Sanchez-Bayoa, F., & Wyckhuy, K. (2019). Worldwide decline of the entomofauna: A review of its drivers. *Biological Conservation*.
- Saunders, M. (2017). Insects in decline: why we need more studies like this. *Ecology Is Not a Dirty Word*.
- Schowalter, T. D., Pandey, M., Presley, S. J., Willig, M. R., & Zimmerman, J. K. (2021). Arthropods are not declining but are responsive to disturbance in the Luquillo experimental forest, Puerto Rico. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 118(2). <https://doi.org/10.1073/PNAS.2002556117>
- Scoble, M. J. (Malcolm J. (1995). *The lepidoptera : form, function, and diversity*. 404. https://books.google.com/books/about/The_Lepidoptera.html?hl=es&id=gnpd_5iNTi wC
- Simon, L. (2018). “Ecological Armageddon” - more evidence for the drastic decline in insect numbers. *Annals of Applied Biology*, 172(1), 1–3. <http://ezproxy.library.uvic.ca/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=bai&AN=126886754&site=ehost-live&scope=site%0A10.1111/aab.12410>
- Smithson, P. A. (2002). IPCC, 2001: climate change 2001: the scientific basis. Contribution of Working Group 1 to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on

- Climate Change, edited by J. T. Houghton, Y. Ding, D. J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der Linden, X. Da. *International Journal of Climatology*, 22(9), 1144–1144. <https://doi.org/10.1002/JOC.763>
- Sorg, M., Schwan, H., Stenmans, W., & Müller, A. (2013). Ermittlung der Biomassen flugaktiver Insekten im Naturschutzgebiet Orbroicher Bruch mit Malaise Fallen in den Jahren 1989 und 2013. *Mitteilungen Aus Dem Entomologischen Verein Krefeld*, 1, 1–5. <http://entomologica.de>
- Southwick, E. E., & Southwick Jr., L. (1992). Estimating the Economic Value of Honey Bees (Hymenoptera: Apidae) as Agricultural Pollinators in the United States. *Journal of Economic Entomology*, 85(3), 621–633. <https://doi.org/10.1093/jee/85.3.621>
- Stemkovski, M., Pearse, W. D., Griffin, S. R., Pardee, G. L., Gibbs, J., Griswold, T., Neff, J. L., Oram, R., Rightmyer, M. G., Sheffield, C. S., Wright, K., Inouye, B. D., Inouye, D. W., & Irwin, R. E. (2020). Bee phenology is predicted by climatic variation and functional traits. *Ecology Letters*. <https://doi.org/10.1111/ele.13583>
- Stork, N. E. (2009). Re-assessing current extinction rates. *Biodiversity and Conservation* 2009 19:2, 19(2), 357–371. <https://doi.org/10.1007/S10531-009-9761-9>
- Storkey, J., Macdonald, A. J., Bell, J. R., Clark, I. M., Gregory, A. S., Hawkins, N. J., Hirsch, P. R., Todman, L. C., & Whitmore, A. P. (2016). The Unique Contribution of Rothamsted to Ecological Research at Large Temporal Scales. In *Advances in Ecological Research* (Vol. 55, pp. 3–42). Academic Press Inc. <https://doi.org/10.1016/bs.aecr.2016.08.002>
- Sugasti, L., & Pinzón, R. (2020). First Approach of Abiotic Drivers of Soil CO2 Efflux in Barro Colorado Island, Panama: <https://doi.org/10.1177/1178622120960096>, 13. <https://doi.org/10.1177/1178622120960096>
- Swaay, C. van, Collins, S., & Dušej, G. (2012). Qué hacer y qué no hacer para las mariposas de la Directiva de Hábitats de la Unión Europea. *Nature*. <https://natureconservation.pensoft.net/article/1326/download/pdf/>
- Thomas, J. A. (2005). *Monitoring change in the abundance and distribution of insects using butterflies and other indicator groups*. <https://doi.org/10.1098/rstb.2004.1585>
- Tiede, Y., Schlautmann, J., Donoso, D. A., Wallis, C. I. B., Bendix, J., Brandl, R., & Farwig, N. (2017). Ants as indicators of environmental change and ecosystem processes. *Ecological Indicators*, 83, 527–537. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2017.01.029>
- Toranzo, L. (2016). Cambio climático y su influencia sobre la Antártida. *Cambio Climático*.
- Vargas, P. (2013). *El árbol de la vida: sistemática y evolución de los seres vivos* (ISBN).
- Vasconcellos, A., Araújo, V. F. P., Moura, F. M. S., & Bandeira, A. G. (2007). Biomass and population structure of *Constrictotermes cyphergaster* (Silvestri) (Isoptera: termitidae) in the dry forest of caatinga, northeastern Brazil. *Neotropical Entomology*, 36(5), 693–698. <https://doi.org/10.1590/S1519-566X2007000500009>

- Vásquez-Bolaños, M. (2011). Lista de especies de hormigas (Hymenoptera: Formicidae) para México. *Antwiki.Net*.
<https://www.antwiki.net/wiki/images/3/3f/VásquezBolaños2011Mexico.pdf>
- Wagner, D. L. (2020). Insect Declines in the Anthropocene. *Annual Review of Entomology*, 65(1), 457–480. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-011019-025151>
- Walpole, M., Almond, R. E. A., Besançon, C., Butchart, S. H. M., Campbell-Lendrum, D., Carr, G. M., Collen, B., Collette, L., Davidson, N. C., Dulloo, E., Fazel, A. M., Galloway, J. N., Gill, M., Goverse, T., Hockings, M., Leaman, D. J., Morgan, D. H. W., Revenga, C., Rickwood, C. J., ... Zimsky, M. (2009). Tracking progress toward the 2010 biodiversity target and beyond. In *Science* (Vol. 325, Issue 5947, pp. 1503–1504). American Association for the Advancement of Science.
<https://doi.org/10.1126/science.1175466>
- Wappler, T., Labandeira, C. C., Rust, J., Frankenhäuser, H., & Wilde, V. (2012). Testing for the effects and consequences of mid paleogene climate change on insect herbivory. *PLoS ONE*, 7(7). <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0040744>
- Wilson, O. (1988). *Rev. Biol. Trop.* 36 (2B): 579-580, 1988. 36, 579–580.
- Wilson, R. J., & Fox, R. (2021). Insect responses to global change offer signposts for biodiversity and conservation. *Ecological Entomology*, 46(4), 699–717.
<https://doi.org/10.1111/EEN.12970>
- Wilson, R. J., & Maclean, I. M. D. (2010). Recent evidence for the climate change threat to Lepidoptera and other insects. *Journal of Insect Conservation* 2010 15:1, 15(1), 259–268. <https://doi.org/10.1007/S10841-010-9342-Y>
- Wright, D. H. (1991). Correlations Between Incidence and Abundance are Expected by Chance. *Journal of Biogeography*, 18(4), 463. <https://doi.org/10.2307/2845487>
- Zhang, D. X., & Hewitt, G. M. (1997). Assessment of the universality and utility of a set of conserved mitochondrial COI primers in insects. *Insect Molecular Biology*, 6(2), 143–150. <https://doi.org/10.1111/J.1365-2583.1997.TB00082.X>

Anexos

Anexo 1 Descripción de las series

Hemiptera

Insectos que se alimentan de succionar savia o fluidos animales, entre los más conocidos están pulgones, cigarras o chinches (Martin & Webb, 1999). Estos insectos fueron recolectados con trampas de luz, cuatro veces por año en dos réplicas. En la Figura A1.2 se presentan los gráficos de abundancia anual y la diferencia en abundancia por recolección.

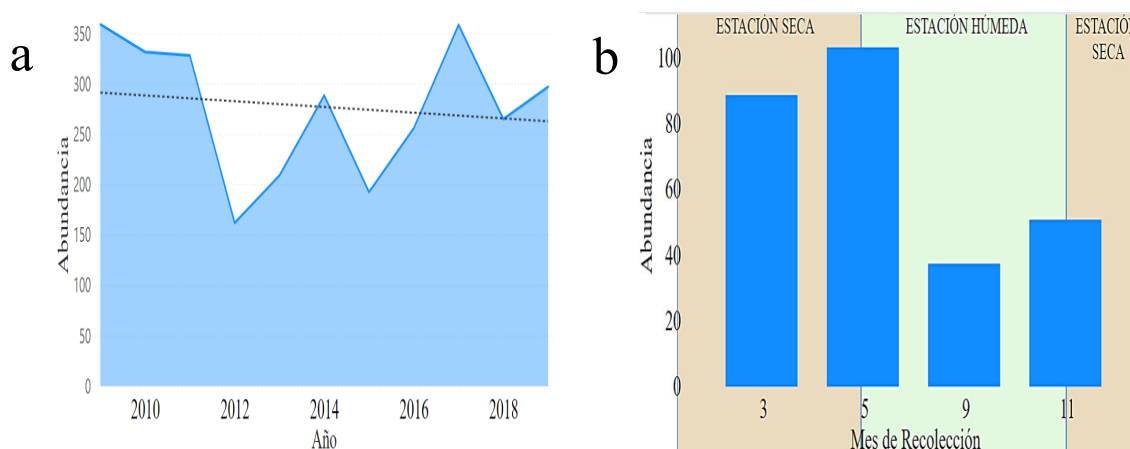


Figura A1.1. Abundancia de Hemiptera en la Isla Barro Colorado entre los años 2009 y 2019.

En (a) se muestra la distribución de la abundancia en cada recolección, en (b) se muestra la distribución anual de la serie con su tendencia.

Elaboración: Autor

En la Figura A1.2 (a) se observa que la abundancia de hemípteros tiene una tendencia casi constante, teniendo sus puntos más altos en 2009 y 2017 con 359 insectos recolectados, su punto más bajo en 2012 con 162 insectos. Con respecto a su composición, los hemípteros se dividen en la familia Flatidae que compone el 59 %, los cuales, son insectos que producen ciertos sonidos como forma de comunicación como luciérnagas, también la familia Reduviidae compone el 41 %, son insectos predadores que incluyen chinches asesinas, vinchucas y boticarios (Dietrich & Carde, 2003). Con respecto a la diferencia por estaciones, en la Figura A1.2 (b) se observa que existe un cambio entre estación seca (mayor abundancia)

con respecto a la estación húmeda, en el cambio de temporada seca a húmeda es la recolección con más abundancia con 103 hemípteros en promedio y luego cae a 37 insectos en el pico de la estación húmeda.

Lepidoptera

Los lepidópteros son el segundo orden con más especies entre los insectos y son de los más aceptados por el ser humano por sus colores, entre sus representantes están las mariposas (Scoble, 1995). Fueron recolectados 4 veces al año tanto con trampas de luz en dos réplicas, como con el método transect en el cual fueron tres réplicas. En la Figura A1.3 se presentan los datos de esta serie, su distribución anual y su diferencia entre recolecciones.

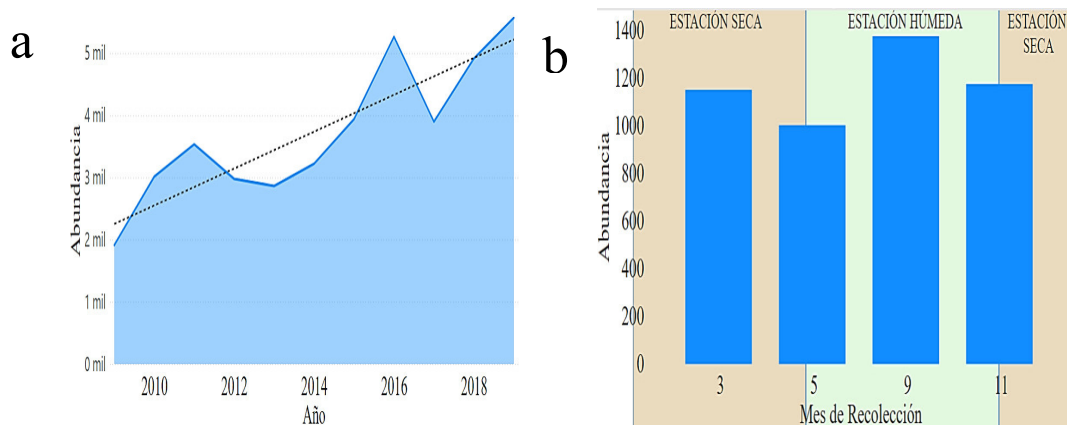


Figura A1.2. Abundancia de Lepidoptera en la Isla Barro Colorado entre los años 2009 y 2019.

En (a) se muestra la distribución de la abundancia en cada recolección, en (b) se muestra la distribución anual de la serie con su tendencia.

Elaboración: Autor

En la Figura A1.3 (a) se evidencia que la abundancia de insectos tiene tendencia creciente en general, con su punto más bajo en 2009 con 1912 insectos, su punto más alto en 2019 con 5569 insectos recolectados. En este orden se recolectaron 20 familias diferentes, teniendo la distribución de las familias más representativas en el Anexo 4. No existe una diferencia importante entre las recolecciones, pero se debe considerar que estas familias de insectos se recolectan más en el pico de estaciones húmedas, lo cual no ha pasado con ninguna otra familia en este estudio.

Hymenoptera

El orden Hymenóptera comprende abejas, abejorros, avispas y hormigas (Arnett Jr., 2000). En esta serie solo se tomará en cuenta a abejas, abejorros y avispas por sus diferencias taxonómicas con respecto a las hormigas y además, su cambio en número de recolecciones. La tendencia de la abundancia de himenópteros ha sido creciente, con su punto más bajo en 2009 con 1 747 insectos y más alto en 2019 casi 4000 insectos recolectados como se puede verificar en la Figura A1.4 (a).

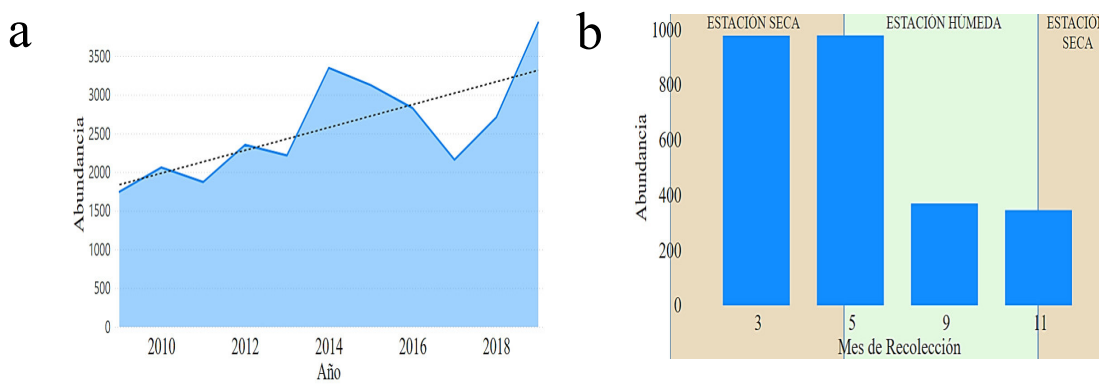


Figura A1.3. Abundancia de Hymenoptera en la Isla Barro Colorado entre los años 2009 y 2019.

En (a) se muestra la distribución de la abundancia en cada recolección, en (b) se muestra la distribución anual de la serie con su tendencia.

Elaboración: Autor

La composición de la serie se la puede observar en el Anexo 5, se tiene que el 86 % son de la familia Apidae entre las que están las abejas domésticas, parasitarias, sin aguijón o de orquídeas (Arnett Jr., 2000); y el 14 % son de la familia Halictidae que entre sus representantes son abejas del sudor, entre otras (Pabalan et al., 2000).

En la Figura A1.4 (b) se puede apreciar que en la estación seca se recolecta más del doble de insectos en promedio que en la estación húmeda, esto se puede dar porque el ciclo fenológico de estas especies es marcado y salen mucho más a labores de campo en la estación seca.

Formicidae

Las hormigas (Formicidae) tienen gran capacidad de adaptación y han colonizado casi todos los territorios del mundo, pertenecen al orden Hymenoptera (Ward, 2007), en esta clasificación se tomará en cuenta a las hormigas recolectadas por el método Winkler. Se realizó una recolección anual, dándose en los diez puntos con submuestras realizadas cada 5 metros. En la Figura A1.5 se puede apreciar el comportamiento de la abundancia de Formicidae en los años a estudiar.

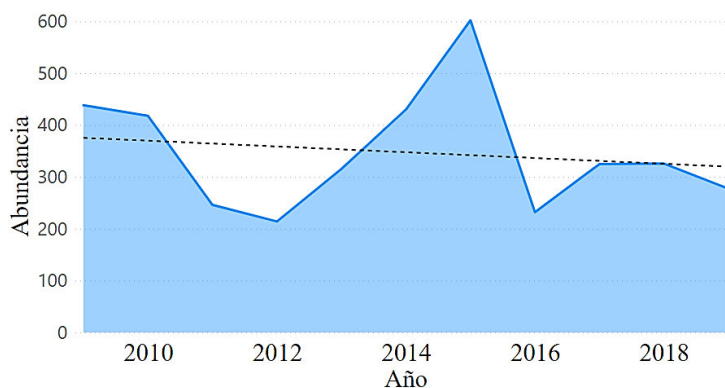


Figura A1.4. Abundancia de Formicidae en la Isla Barro Colorado entre los años 2009 y 2019.

Elaboración: Autor.

La abundancia de hormigas capturadas en trampas Winkler ha tenido una tendencia a la baja, con su punto más alto en 2015 con 602 hormigas recolectadas y su punto más bajo en 2012 con 214.

Formicidae LT

Esta serie la conforman las recolecciones hechas de hormigas en trampas de luz, se realizaron 2 réplicas, el comportamiento de esta serie se lo observa en la Figura A1.6 (a) con una tendencia a la baja y con sus valores más bajos en 2011 y 2018 con 290 y 376 insectos respectivamente y su pico de abundancia en 2012 con 1244 insectos.

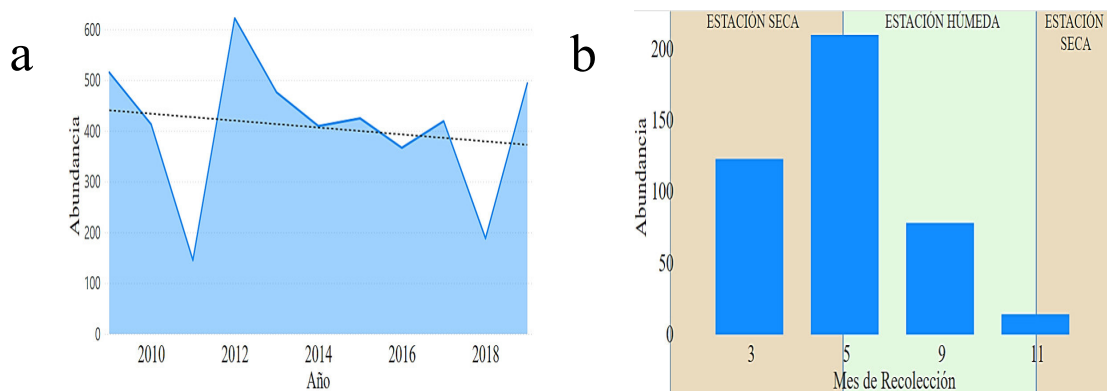


Figura A1.5. Abundancia de Formicidae LT en la Isla Barro Colorado entre los años 2009 y 2019.

En (a) se muestra la distribución de la abundancia en cada recolección, en (b) se muestra la distribución anual de la serie con su tendencia.

Elaboración: Autor.

En la Figura A1.6 (b) se puede observar que existe un marcado cambio entre la abundancia de estación seca a estación húmeda, en el cambio de estación seca a húmeda se recolectaron más de 200 insectos mientras en el cambio de estación húmeda a seca se recolectaron menos de 25.

Isoptera LT I

Comprendida por las termitas de madera seca pertenecientes a la familia Kalotermitidae y al orden Isoptera (Arnett, 2000), se efectuaron cuatro recolecciones por año con dos réplicas. En la Figura A1.7 (a) se presenta la serie en el periodo que se realizó la recolección, se observa que la abundancia de esta serie ha tenido una tendencia a subir, el punto más bajo de abundancia se dio en 2012 con 89 insectos y el pico más alto se presentó en 2019 con 1024 insectos recolectados.

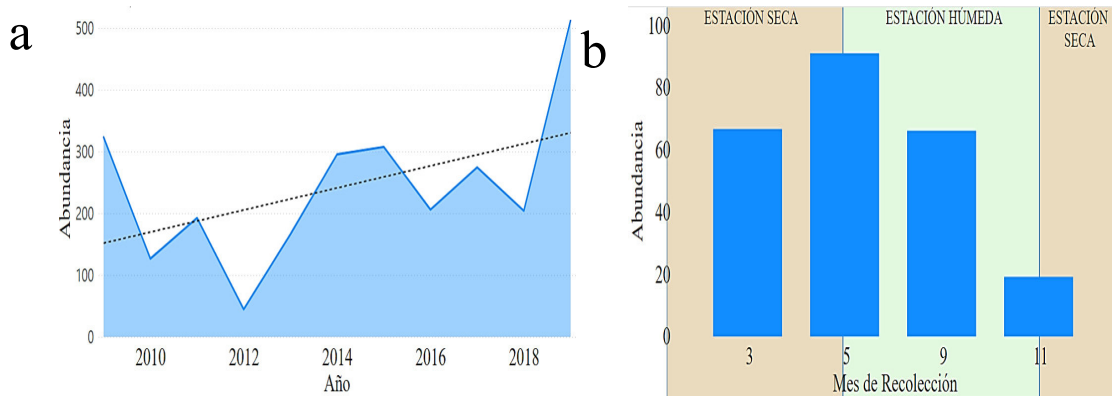


Figura A1.6. Abundancia de Isoptera LT I en la Isla Barro Colorado entre los años 2009 y 2019.

En (a) se muestra la distribución de la abundancia en cada recolección, en (b) se muestra la distribución anual de la serie con su tendencia.

Elaboración: Autor

En la Figura A1.7 (b) se observa que en el cambio de temporada de estación húmeda a seca se da el valor más bajo de abundancia de este tipo de insectos con menos de 20 en total, además, la abundancia en el pico de estación seca y en el pico de estación húmeda es muy parecida.

Isoptera LT II

Esta serie contiene a la familia de las termitas recolectadas por trampas de luz, se tiene a Termitas y Rhynotermitas, pertenecientes al orden Isoptera (Engels, 2011). Sus recolecciones fueron en cuatro puntos cada año con dos réplicas. En la Figura A1.8 se presentan los datos de esta serie.

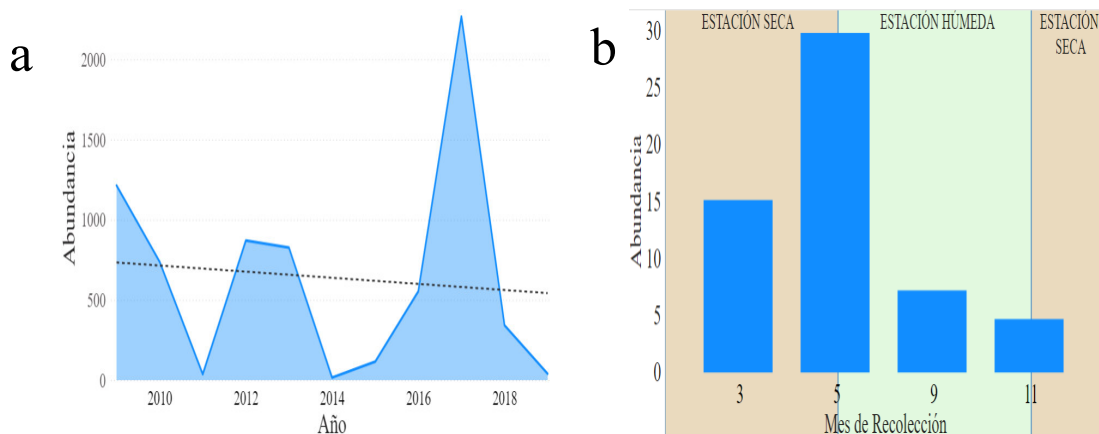


Figura A1.7. Abundancia de Isoptera LT II en la Isla Barro Colorado entre los años 2009 y 2019.

En (a) se muestra la distribución de la abundancia en cada recolección, en (b) se muestra la distribución anual de la serie con su tendencia.

Elaboración: Autor

Esta serie tiene cambios constantes, sus puntos más bajos se dan en 2011 y 2014 con 20 y 11 insectos respectivamente; y su punto más alto 2017 con 2812 insectos, como se puede observar en la Figura A1.8 (a). Cabe mencionar que la abundancia en el año 2017 se ve influenciada por una trampa en la cual se recolectó un valor alto (mayor a 1000) en un solo periodo, esto se justifica por lo mencionado por Perna & Theraulaz (2017) quienes mencionan que las termitas pueden encontrarse en colonias muy numerosas. Además, en la Figura A1.8 (b) se presenta la abundancia total en cada una de las estaciones teniendo un cambio marcado entre el cambio de temporada de seca a húmeda en el que se encontró alrededor de 30 insectos y en el resto de recolecciones el promedio no supera los 15 insectos.

Isoptera

Esta serie comprende las familias de Termitidae y Rhynotermitidae recolectadas por el método Termitidae Qt realizado una vez al año en el mes de junio. En la Figura A1.9 se presentan los datos de esta serie.

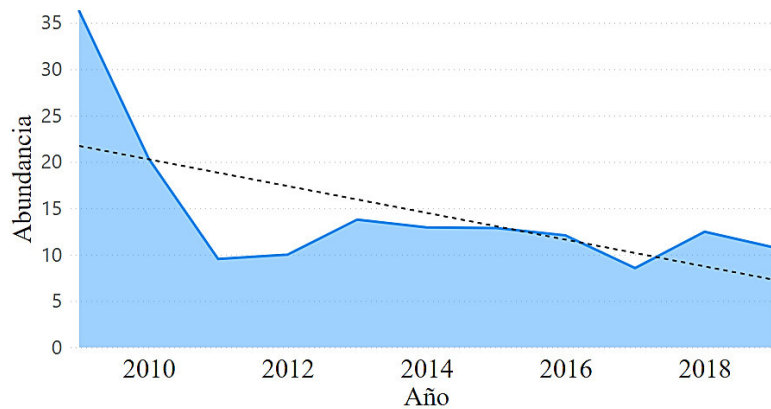


Figura A1.8. Abundancia de Isoptera en la Isla de Barro Colorado.

Elaboración: Autor.

La abundancia de los isópteros III ha tenido una tendencia a la baja, empezando con más de 35 insectos recolectados en 2009 para luego estabilizarse desde el 2011 en menos de 15 insectos recolectados por año.

En el Anexo 5 se presenta la relación existente entre los dos grupos que conforman esta serie teniendo un 78 % de termitas y 22 % de rinotermitas, la principal diferencia entre las dos familias que conforman esta serie es que las termitas, también llamadas termitas superiores, tienen un nivel evolutivo más especializado en relación a las rinotermitas (Engels, 2011).

Anexo 2 Estadística descriptiva variables climáticas.

Temperatura mínima

La temperatura mínima es tomada por un termómetro de mercurio, se mantiene fijo en la temperatura más fría a la que ha sido expuesto. El registro es tomado de forma manual una vez al día, en la Figura A2.1 (a) se presenta el comportamiento anual de la temperatura mínima registrada en Barro Colorado.

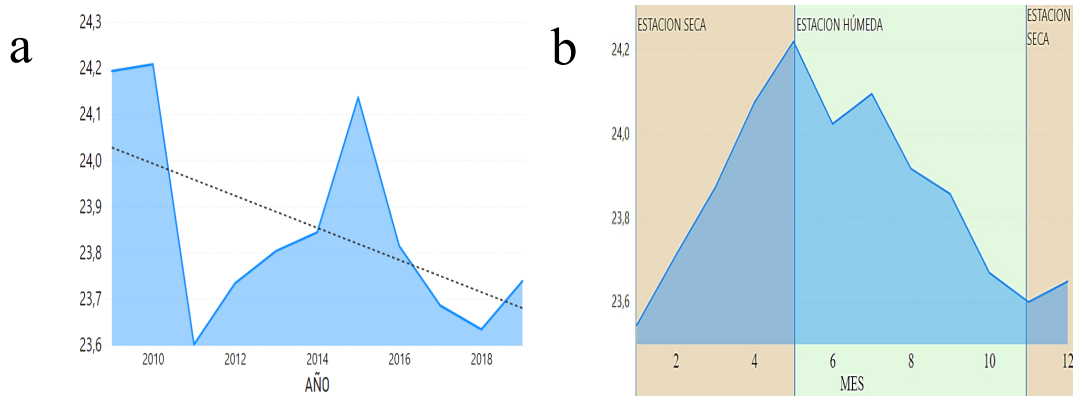


Figura A2.1. Temperatura mínima en Barro Colorado.

En (a) se presenta la distribución anual con su tendencia, en (b) se presenta su distribución estacional.

Elaboración: Autor.

La temperatura máxima reporta una tendencia a la baja, además, el rango aproximado es de 0.6 grados centígrados, esto corrobora lo descrito por Gil & Olcina (2017) quienes reportan que los trópicos se caracterizan por no tener grandes cambios de temperatura y por no sufrir heladas. En la Figura A2.1 (b) se observan los cambios que existen entre las dos estaciones del año, teniendo máximos de temperatura más altos en las temporadas secas, pero hay que tomar en cuenta que la variación máxima entre dos meses del año es de casi dos grados centígrados.

Temperatura máxima

La temperatura máxima fue tomada de manera manual todos los días con la ayuda de un termómetro de mercurio, el cual, se mantiene fijo en la temperatura máxima registrada. A continuación, se presentan los datos de las máximas temperaturas encontradas en la Figura A2.2, teniendo en el apartado (a) la tendencia del promedio anual recolectado en el periodo de estudio y en el apartado (b) se presenta el promedio de variación entre cada mes en todos los años.

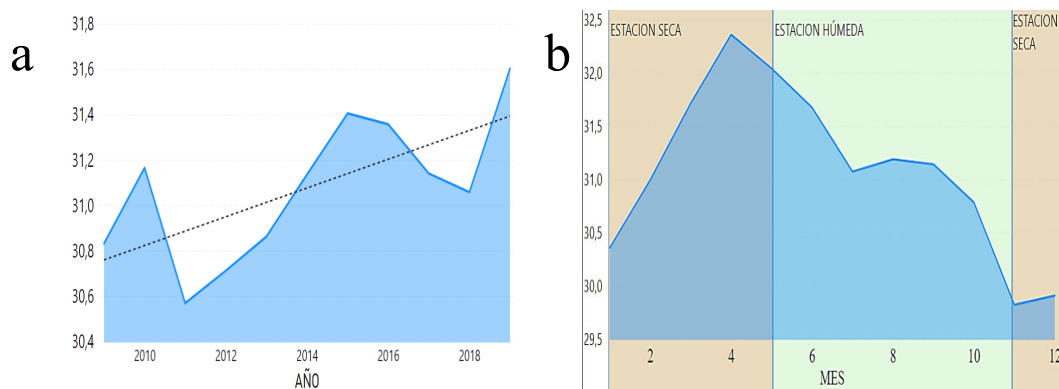


Figura A2 2. Temperatura máxima en Barro Colorado.

En (a) se presenta la distribución anual con su tendencia, en (b) se presenta su distribución estacional.

Elaboración: Autor.

En la Figura A2.2 (a) se presenta la temperatura máxima registrada en los años de estudio, el rango de los valores registrados es aproximadamente un grado centígrado, y tiene una tendencia pequeña al alza. Luego, a partir de la inspección gráfica, en la Figura A2.2 (b) se verifica que la temperatura máxima tiene valores más altos en la temporada seca y sus valores bajan conforme se da la transición a la temporada húmeda.

Humedad relativa

La humedad relativa es el vapor del agua en el aire expresado como un porcentaje (Medrano, 2003), se registra de forma manual en cinco lugares diferentes en todo Barro Colorado entre las 12:00 y 13:00 horas todos los días. La humedad relativa se presenta en la Figura A2.3, tiene un rango entre el 85 y 90 por ciento aproximadamente, teniendo su punto más alto en 2012 con 90.35 % y su punto más bajo en 2015 con un 85.24 %.

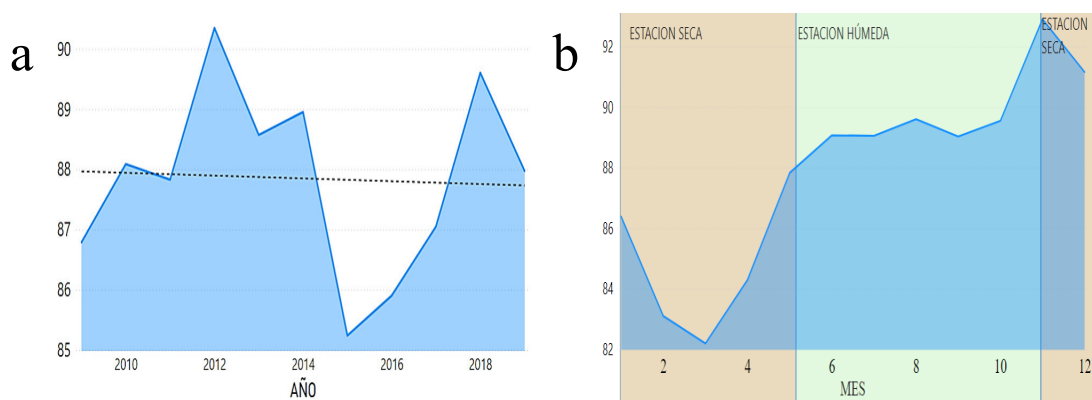


Figura A2.3. Presentación Humedad Relativa en Barro Colorado.

En (a) se presenta la distribución anual con su tendencia, en (b) se presenta su distribución estacional.

Elaboración: Autor.

En la Figura A2.3 (b) se observa que la humedad relativa es menor en la estación seca con su pico más bajo en marzo con un 82 % y es más alta en la estación húmeda con su pico en noviembre con un 93 % de humedad.

Precipitación

La precipitación es medida de forma manual con dos pluviómetros de los cuales se toma el promedio diario, la medida se toma entre las 8:30 y 9:30 de la mañana todos los días laborables. Para los días no laborables se usa un prorrateo el cual divide con una ponderación el valor encontrado para el número de días no muestreados, la ponderación se obtiene por las precipitaciones que fueron registradas por un cubo basculante cercano. En el Anexo 7 se puede observar un ejemplo del método de prorrateo.

En la Figura A2.4 (a) se presentan las precipitaciones anuales en el periodo de estudio, se ha tenido una tendencia decreciente, con su valor más alto en 2010 con 4136 milímetros y su pico más bajo en 2015 con 1810 milímetros.

La cantidad de lluvia es el determinante para el cambio entre estaciones en los trópicos (Gil & Olcina, 2017), esto se puede evidenciar en la Figura A2.4 (b), teniendo menores precipitaciones en la estación seca y mayores en la estación húmeda.

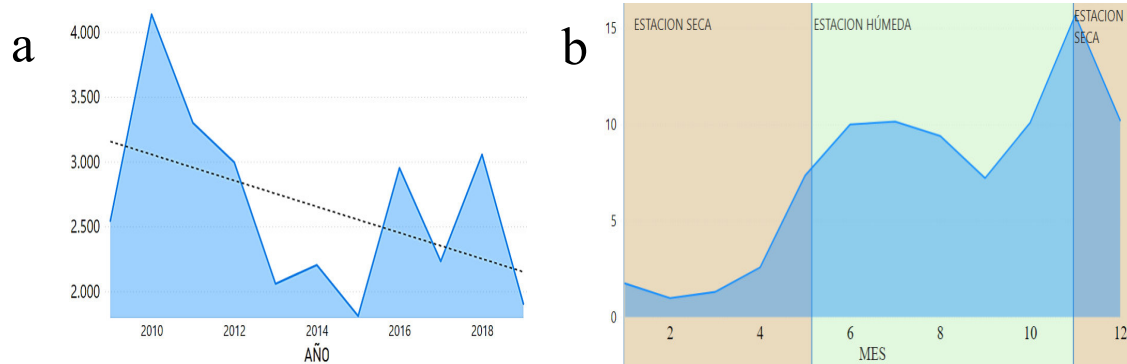


Figura A2.4. Presentación Precipitación en Barro Colorado.

En (a) se presenta la distribución anual con su tendencia, en (b) se presenta su distribución estacional.

Elaboración: Autor.

Evapotranspiración

La evapotranspiración se puede medir de diferentes formas, en general, se define como la pérdida de humedad en la superficie terrestre (Jensen et al., 2006). En este estudio se toma en cuenta la evapotranspiración potencial la cual se define como la máxima cantidad de agua que puede evaporarse en un determinado tiempo, esta puede ser una medida de humedad y aridez del suelo (Rovira, 1976). Las recolecciones son diarias de 8:30 a 9:30 horas todos los días laborables, en el caso de los días no laborables se proratea dividiendo de manera uniforme para los días en los cuales no se realizó el registro, en el Anexo 7 se da un ejemplo.

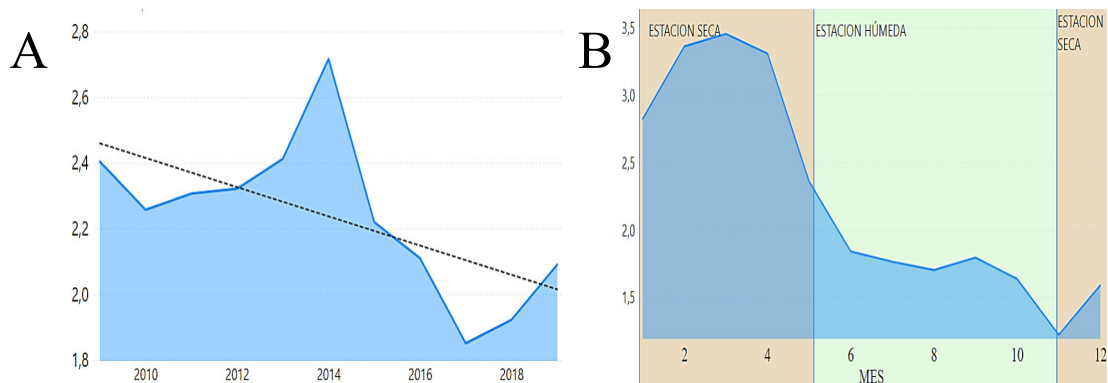


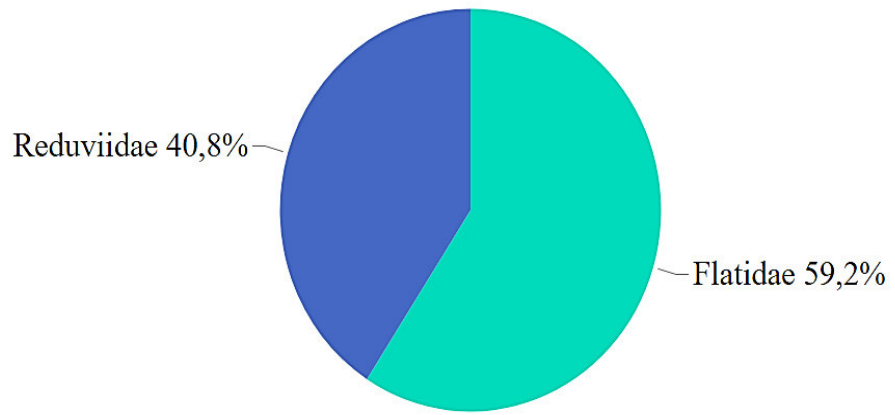
Figura A2.5. Presentación Evapotranspiración Máxima en Barro Colorado.

En (a) se presenta la distribución anual con su tendencia, en (b) se presenta su distribución estacional.

Elaboración: Autor.

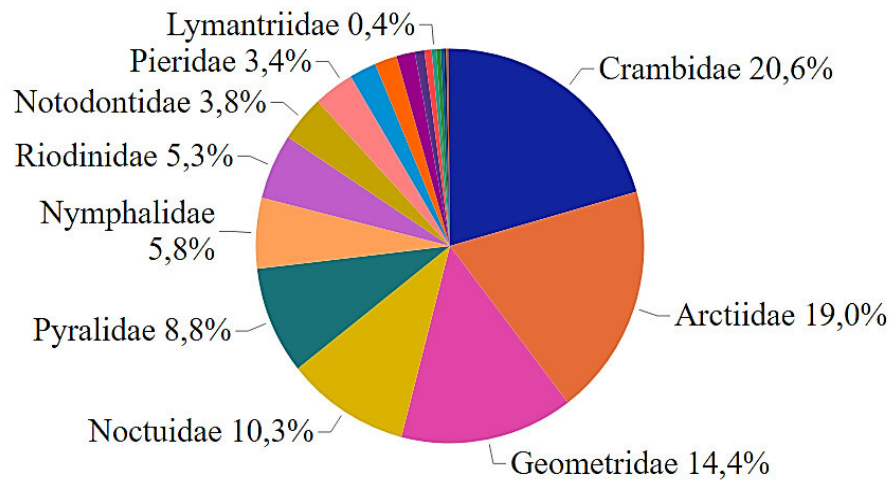
En la Figura A2.5 (a) se presentan los promedios anuales de evapotranspiración, la cual, tiene una tendencia decreciente, desde el 2014 ha tenido un decrecimiento significativo desde 2.7 cm llegando en 2017 a menos de 1.7 cm. También, en la Figura A2.5 (b) se observa que en la estación seca sube la evapotranspiración con respecto a la estación húmeda.

Anexo 3 Distribución Coleoptera



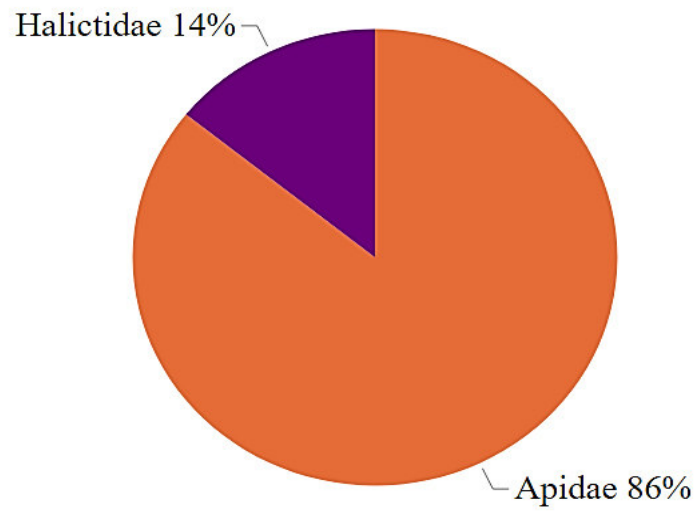
Elaboración: Autor

Anexo 4 Distribución Lepidoptera



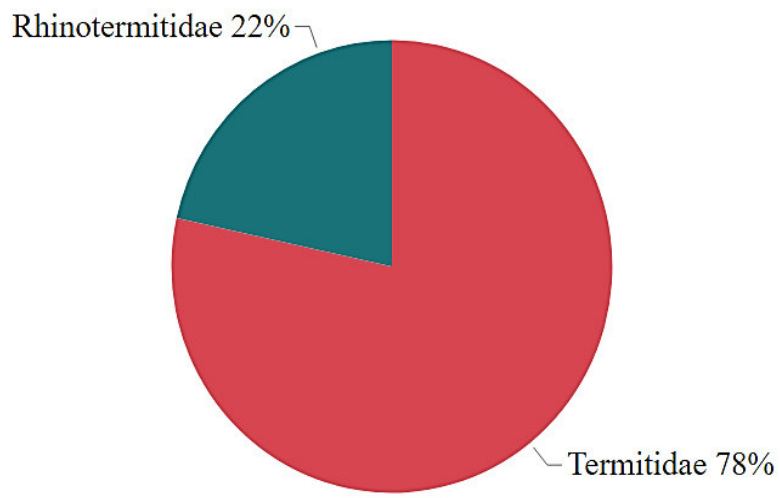
Elaboración: Autor

Anexo 5 Distribución Hymenóptera



Elaboración: Autor

Anexo 6 Distribución Isoptera LT II



Elaboración: Autor

Anexo 7. Ejemplo prorrateo precipitaciones

Día	Precipitación	Registro cubo basculante	Precipitación prorrateada
1	Perdido	40	50
2	Perdido	25	31.25
3	100	15	18.75

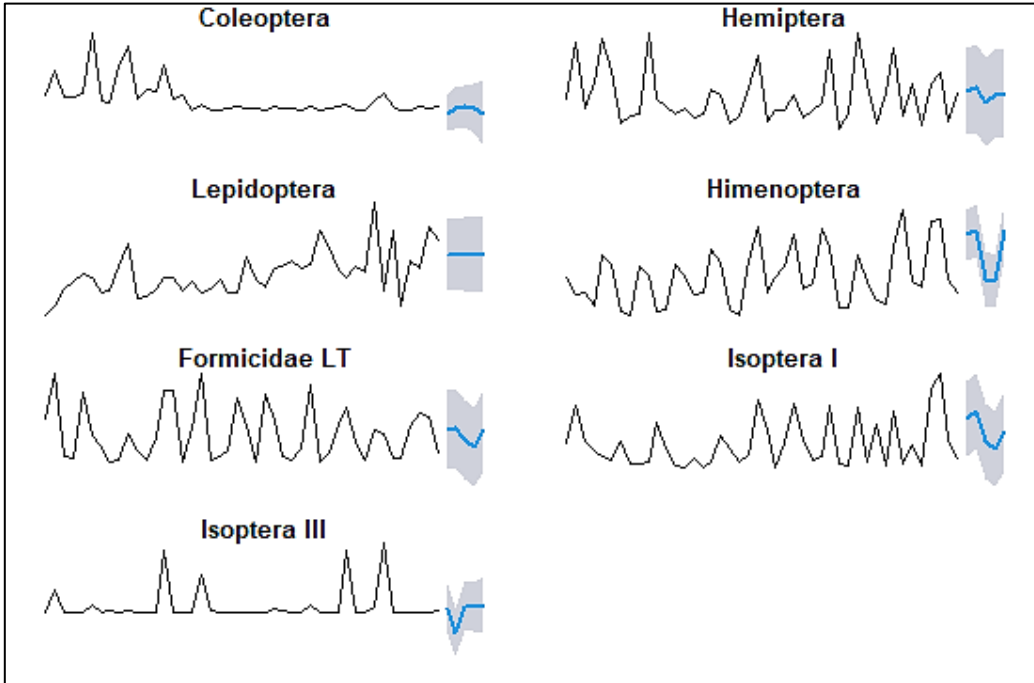
Elaboración: Programa de Monitorización Física-Instituto Smithsonian

Anexo 8. Ejemplo prorrateo evapotranspiración

Día	Evapotranspiración	Evapotranspiración prorrateada
1	Perdido	5
2	Perdido	5
3	15	5

Elaboración: Programa de Monitorización Física-Instituto Smithsonian

Anexo 9. Pronósticos series trimestrales



Elaboración: Autor

Anexo 10. Modelo y Pronósticos series anuales

Serie	Modelo		Pronóstico 2020	Pronóstico 2021
Formicidae	Arima(1,0,0)	L. Inf	23	28
		Estim	342	347
		L. Sup	666	678
Isoptera III	Arima(1,0,0)	L. Inf	0	1
		Estim	13	14
		L. Sup	38	32

Elaboración: Autor

Anexo 11. Factor de inflación de la Varianza (VIF)

Modelo	Humedad	Lluvia	Evapotranspiración	Temperatura mínima	Temperatura máxima	Recolección A	Recolección B	Recolección C	Recolección D
Coleoptera		3.29	2.93	1.61			1.33		
Hemiptera		3.363	3.016		1.867			1.197	
Lepidoptera	1.863	3.401		2.842			1.569		
Hymenoptera			1.803		2.047	2.733			
Formicidae LT	1.88	1.56	1.25	1.78					
Isoptera LT I		1.55	1.45		1.96				
Isoptera LT II		1.44	1.85		2.01				
Isoptera	1.25	1.45	2.02		1.08				
Formicidae	1.05				1.78				

Elaboración: Autor

Anexo 12 Devianza GLM

Modelo	Devianza
Coleoptera	0.00
Hemiptera	0.01
Lepidoptera	0.00
Hymenoptera	0.00
Formicidae LT	0.02
Isoptera LT I	0.00
Isoptera LT II	0.03
Isoptera	0.00
Formicidae	0.01

Anexo 13 Test Hosmer-Lemeshow

Modelo	Valor
Coleoptera	49.89
Hemiptera	43.09
Lepidoptera	14.59
Hymenoptera	66.5
Formicidae LT	33.5
Isoptera LT I	47.2
Isoptera LT II	89.2
Isoptera	33.2
Formicidae	48.2

Elaboración: Autor