



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

UNIDAD REGIONAL UNIVERSITARIA DE ZONAS ÁRIDAS

Maestría en Ciencias en Recursos Naturales y Medio Ambiente en Zonas Áridas

Impacto de la temperatura ambiental en *Apis mellifera* e identificación de zonas potenciales para la apicultura en la Comarca Lagunera

T E S I S

Que como requisito parcial

Para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN RECURSOS NATURALES Y MEDIO AMBIENTE
EN ZONAS ÁRIDAS

Presenta:

JUAN TELLO RUIZ

Bajo la supervisión del Dr. Armando López Santos



Bermejillo, Durango, México. Junio 2025



inifap
Instituto Nacional de Investigaciones
Forestales, Agrícolas y Pecuarias

Tesis realizada por **JUAN TELLO RUIZ** bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN RECURSOS NATURALES Y MEDIO AMBIENTE
EN ZONAS ÁRIDAS**

DIRECTOR



Dr. Armando López Santos

CO-DIRECTOR



Dr. Jorge Luis Becerra López

ASESOR



Dr. Miguel Ángel Mata Espinosa

ASESOR



Dr. José Villanueva Díaz

CONTENIDO

RESUMEN GENERAL.....	9
GENERAL ABSTRACT.....	10
CAPITULO I. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	11
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	14
1.3 OBJETIVOS.....	14
1.3.1 Objetivo general.....	14
1.3.2 Objetivos específicos.....	15
1.4 HIPÓTESIS GENERAL.....	15
1.5 LIERATURA CITADA.....	15
CAPITULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	19
2.1 El rol ecológico de <i>Apis mellifera</i> y la vulnerabilidad de los ecosistemas ante el cambio climático.....	19
2.2 Cambio climático y calentamiento global.....	19
2.3 Insectos: Organismos ectotermos.....	20
2.4 <i>Apis mellifera</i>	20
2.4.1 Estructura social: castas de abejas melíferas.....	21
2.5 Apicultura en México y la Comarca lagunera.....	22
2.6 Variables ambientales que afectan a <i>A. mellifera</i>	23
2.7 Conceptos básicos y aplicaciones del modelo de nicho ecológico.....	23
2.8 LITERATURA CITADA.....	24
CAPITULO 3. Evaluación del impacto del incremento de la temperatura ambiental en la morfometría de abejas obreras de <i>Apis mellifera</i>	35
3.1 RESUMEN.....	36
3.2 ABSTRACT.....	36
3.3 INTRODUCCIÓN.....	37
3.4 MATERIALES Y MÉTODOS.....	38
3.4.1 Ubicación geográfica del área de estudio.....	38
3.4.2 Material biológico.....	38

3.4.3 Diseño y conducción experimental	39
3.4.4 Variables morfométricas	40
3.4.5 Análisis estadístico	40
3.5 RESULTADOS.....	41
3.6 DISCUSIÓN	44
3.7 CONCLUSIÓN	46
3.8 LITERATURA CITADA	46
CAPITULO 4. Identificación de zonas potenciales para la apicultura en la Comarca Lagunera ante el cambio climático	50
4.1 RESUMEN	50
4.2 ABSTRACT	51
4.3 INTRODUCCIÓN	52
4.4 MATERIALES Y MÉTODOS.....	53
3.4.1 Ubicación geográfica del área de estudio.....	53
3.4.2 Preparación y realización del modelado correlativo y mecanicista	54
4.4.3 Obtención de muestras y registros geográficos.....	54
4.4.4 Identificación de TCmax y TCmin	55
4.4.4.1 Preparación de datos para el modelo correlativo.....	55
4.4.5 Preparación de datos para el modelo mecanicista	56
4.4.6 Zonificación	56
4.4.7 Selección de Variables Bioclimáticas	56
4.4.8 Modelo de nicho correlativo y mecanicista	58
4.4.9 Modelo de nicho correlativo y mecanicista para el año 2021-2040	59
4.5 RESULTADOS.....	60
4.6 DISCUSIÓN	64
4.7 CONCLUSIÓN	65
4.8 LITERATURA CITADA	66

ÍNDICE DE CUADROS

CAPITULO 2

Cuadro 1. Diseño experimental	39
Cuadro 2. Valores de correlación entre las variables morfométricas.....	42
Cuadro 3. Prueba Post hoc de Bonferroni entre tratamientos de temperatura.....	43
Cuadro 4. se muestran los estadísticos descriptivos de las variables en estudio para cada uno de los tratamientos térmicos.	44

CAPITULO 3

Cuadro 1. 19 variables bioclimáticas - WorldClim	57
--	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Preparación y realización del modelo mecanicista	54
Figura 2. Análisis de correlación bivariada de las variables bioclimáticas....	61
Figura 3. Modelo de Idoneidad de Hábitat de <i>A. mellifera</i> para el clima actual	62
Figura 4. Curva de ROC para el modelo de idoneidad de Hábitat para el clima actual con valor un valor de AUC de 9.3	62
Figura 5. Modelo de Idoneidad de Hábitat de <i>A. mellifera</i> para el clima futuro.....	63
Figura 6. Curva de ROC para el modelo de idoneidad de Hábitat para el clima futuro con valor un valor de AUC de 9.4	64

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) por el apoyo económico con el que pude desarrollar este proyecto de investigación.

A la Universidad Autónoma Chapingo-URUZA por brindarme un lugar en su programa de posgrado en donde pude desarrollarme y desempeñarme académicamente.

A mi comité asesor: Dr. Jorge Luis Becerra López, Dr. Armando López Santos, Dr. Miguel Ángel Mata Espinosa y Dr. José Villanueva Díaz, por los comentarios, observaciones y el apoyo durante mi estancia.

Al Dr. Cesar Alberto Meza Herrera por el apoyo durante su periodo como coordinador de posgrado, por siempre estar atento a las necesidades del programa.

A los maestros de posgrado por compartir sus conocimientos y experiencias contribuyendo a mi formación durante mis estudios.

A la Ing. Ana Cecilia Portillo Báez y a la Q.F.B Sara Linnet Luna Reyes por ser excelentes compañeras durante mi estancia, haciendo más ameno y agradable el tiempo en la institución.

DEDICATORIA

Dedico y agradezco a Silvia Alejandra Escalera Villarreal, por estar siempre presente y estar a mi lado durante esta etapa, por ser la mejor compañera que pude tener, por ser mi fortaleza y motivación de ser mejor persona y ser mejor en mis propósitos.

A mis padres, Ma. Guadalupe Ruiz Cisneros y Manuel Tello Guerrero, por ser mi mayor ejemplo a seguir, por apoyarme incondicionalmente en mis metas, por criarme con buenos valores y por ser mis guías de vida y por ellos llegar a ser lo que soy.

A mi hermano Manuel Tello Ruiz, por ser un ejemplo, por el apoyo y por las buenas experiencias y compañía a diario.

Y a todos aquellos amigos y compañeros que formaron parte de este proceso y que de alguna manera me ayudaron, gracias por los buenos momentos que compartimos, las risas y el tiempo de calidad.

DATOS BIOGRÁFICOS

Datos personales

Nombre: Juan Tello Ruiz

Fecha de nacimiento 02 de agosto de 1999

Lugar de nacimiento: Gómez Palacio, Durango

CURP: TERJ990802HDGLZN09

Profesión: Biólogo

Cédula profesional: 14608498



Desarrollo académico

Preparatoria: CECyTED 13 Nazareno, Durango, México (2014-2017)

Licenciatura: Facultad de Ciencias Biológicas – Universidad Juárez del Estado de Durango, Gómez Palacio, Durango (2017-2021)

Desarrollo científico

Participación como co-autor en la publicación: Does size matter? An analysis of the niche width and vulnerability to climate change of fourteen species of the genus *Crotalus* from North America.

RESUMEN GENERAL

Impacto de la temperatura ambiental en *Apis mellifera* e identificación de zonas potenciales para la apicultura en la Comarca Lagunera

La abeja *Apis mellifera* cumple un rol fundamental como agente polinizador, favoreciendo la estabilidad ecológica y la productividad agrícola mediante la preservación de la biodiversidad. No obstante, el cambio climático compromete su salud y funcionalidad, intensificando la pérdida de hábitat, la degradación de servicios ecosistémicos clave y la seguridad alimentaria a escala regional y global. El objetivo de este estudio fue evaluar el impacto de la temperatura ambiental en *A. mellifera* e identificar zonas potenciales para la apicultura en la Comarca Lagunera ante proyecciones de cambio climático. Con este propósito, inicialmente se realizaron pruebas en individuos de *A. mellifera* con diferentes tratamientos térmicos con la finalidad de identificar variaciones morfométricas inducidas por los tratamientos. Por otra parte, se obtuvieron registros geográficos de colmenas silvestres para realizar un modelado de nicho desde los enfoques mecanístico y correlativo, con la finalidad de identificar zonas climáticamente idóneas para la especie. Los resultados indicaron un impacto negativo en la morfometría de *A. mellifera*, reduciendo sus estructuras anatómicas gradualmente en cada tratamiento térmico, además que, según la evidencia las estructuras con mayor afectación podrían comprometer la capacidad de vuelo de la abeja. Así mismo, mediante el modelado de nicho se identificaron zonas climáticas potencialmente óptimas para *A. mellifera*. Con esta información y prácticas de adaptación por parte de los apicultores, se podría desarrollar y proliferar con resultados positivos la apicultura regional en la Comarca Lagunera.

Palabras clave: Abeja, cambio climático, morfometría, modelado de nicho, polinizador.

Tesis de Maestría en Ciencias, Posgrado en Recursos Naturales y Medio Ambiente en Zonas Áridas, Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas.

Autor: Juan Tello Ruiz

Director de tesis: Dr. Armando López Santos

GENERAL ABSTRACT

Impact of ambient temperature on *Apis mellifera* and identification of potential areas for beekeeping in the Comarca Lagunera

The honeybee *Apis mellifera* plays a critical role as a pollinator, enhancing ecological stability and agricultural productivity through biodiversity conservation. However, climate change threatens its health and functionality by exacerbating habitat loss, degrading key ecosystem services, and undermining food security at regional and global scales. This study aimed to assess the impact of ambient temperature on *A. mellifera* and to identify potential areas for beekeeping in the Comarca Lagunera area under future climate projections. First, live specimens were subjected to a series of thermal treatments to quantify morphometric changes induced by elevated temperatures. Second, geographic occurrence records of wild colonies were compiled to perform niche modeling using both mechanistic and correlative approaches, with the objective of delineating climatically suitable habitats for the species. Results revealed a progressive reduction in key anatomical structures with increasing thermal stress, with the most affected features likely impairing flight capacity. Moreover, niche modeling identified several optimal climatic zones for *A. mellifera* in the Comarca Lagunera. These findings, combined with targeted adaptation strategies by local beekeepers, could facilitate the sustainable development and expansion of regional beekeeping operations.

Keywords: Bee, climate change, morphometry, niche modeling, pollinator.

Master's Thesis in Science, Graduate Program in Natural Resources and Environmental in Arid Zones, Universidad Autónoma Chapingo, Regional University Unit of Arid Zones.

Author: Juan Tello Ruiz

Advisor: Dr. Armando López Santos

CAPITULO I. INTRODUCCIÓN GENERAL

La abeja *Apis mellifera* representa un componente esencial en la dinámica de los ecosistemas naturales y agrícolas, al ser un agente polinizador clave que sostiene la diversidad vegetal y potencia la productividad de numerosos cultivos (Papa et al., 2022). Su labor favorece el equilibrio ecológico al facilitar procesos reproductivos en plantas silvestres y cultivadas, asegurando así el mantenimiento de redes tróficas y la provisión de servicios ecosistémicos indispensables (Richardson, 2023).

No obstante, los ecosistemas enfrentan una disminución acelerada, impulsada por múltiples factores antropogénicos, entre ellos el cambio climático (Malhi et al., 2020). Las alteraciones en las variables climáticas afectan los rangos de distribución, la fenología y la fisiología de las especies, provocando extinciones locales y reconfiguraciones comunitarias (Beaugrand & Kirby, 2018). Esta pérdida no solo representa una amenaza ecológica, sino que compromete servicios ecosistémicos esenciales como la polinización, el control del clima, la purificación del aire y la regulación hídrica (Onoh et al., 2024).

El cambio climático es una de las mayores amenazas para la apicultura (Roy et al., 2018) y representa un problema ambiental crítico a nivel global, afectando de manera variable a distintas regiones del planeta (Pacheco & Hernández, 2019). Uno de sus principales efectos es el calentamiento global, un incremento sostenido en la temperatura media de la superficie terrestre (José & Alarcón-Hincapié, 2016; Samé & Durán, 2018). Este fenómeno es impulsado por la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), entre ellos el dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxidos de nitrógeno (NO_x), ozono (O₃), vapor de agua (H₂O) y clorofluorocarbonos (CFCs) (González et al., 2003; Hernández, 2020).

El calentamiento global impacta significativamente a plantas y animales, provocando la pérdida de hábitat y aumentando su vulnerabilidad fisiológica

(Bozinovic & Cavieres, 2019). Esta vulnerabilidad determina la capacidad de las especies para responder a cambios en el clima (Becerra-López et al., 2017). Algunos organismos, con una baja capacidad de adaptación, enfrentan un mayor riesgo ante estas alteraciones ambientales (Arribas et al., 2012), siendo especialmente vulnerables aquellos con respuestas fisiológicas limitadas (Pörthner et al., 2022).

Los organismos ectotermos, como insectos y reptiles, son especialmente vulnerables al aumento de la temperatura, ya que no pueden regular internamente su temperatura corporal (Gao et al., 2016). Su actividad depende del ambiente térmico, y en condiciones de mayor calor, experimentan un desarrollo acelerado, envejecen más rápido e incrementan su tasa metabólica, lo que eleva su demanda energética y necesidad de alimento (Garibaldi & Paritsis, 2012).

Un organismo ectotermo como lo es la abeja *A. mellifera* requiere temperaturas internas de entre 34°C y 35°C en la colmena para un desarrollo óptimo (Le Conte & Navajas, 2008). Por ello, la temperatura ambiental es el factor abiótico más relevante, ya que influye directamente en el crecimiento larval y, en consecuencia, en el comportamiento y funcionamiento de la colmena (Mendizabal, 2005; Ali, 2011).

Algunos de los estudios donde evaluaron aspectos de la especie con su medio ambiente han reportado que temperaturas superiores a 32°C reducen la captación de polen en la subespecie *Apis mellifera florare* (Reddy et al., 2012), observándose un patrón similar en *A. mellifera* en cultivos de Guzoia abyssinica (Gebremedhn et al., 2014). Además, investigaciones en *A. mellifera* y la especie *A. cerana* indican que el calor extremo y la alta humedad afectan negativamente a ambas especies, provocando pérdida de agua y aumentando el estrés oxidativo (Li et al., 2019).

Desde el concepto de nicho ecológico, es posible evaluar la vulnerabilidad de *A. mellifera* ante el aumento de temperatura causado por el cambio climático. Para ello, se emplean modelos de nicho ecológico que permiten proyectar cómo cambiaría su distribución ante distintos escenarios ambientales (Melo-Merino et al., 2020). Los modelos correlativos, relacionan la presencia de la especie con variables climáticas relevantes (Guisan & Zimmermann, 2000; Elith et al., 2006), mientras que los modelos mecanicistas integran información fisiológica para predecir respuestas más precisas al estrés térmico (Kearney, 2006). Estas herramientas ayudan a identificar áreas de riesgo y posibles refugios climáticos para su conservación.

Además del rol ecológico que desempeña *A. mellifera*, esta especie tiene una gran relevancia por su aprovechamiento sustentable para el ser humano mediante la práctica de la apicultura (Gómez-Leyva et al., 2022). Su valor radica tanto en la producción de recursos como miel, jalea real, propóleo, polen y cera (Garry et al., 2017; Miño, 2019). El éxito de *A. mellifera* en la apicultura se debe a su alta productividad y por la obtención de néctar de una gran diversidad de flores (Baena-Díaz et al., 2022). En México, en 2023 hubo una producción de más de 58,000 toneladas de miel y en la Comarca Lagunera se produjeron más de 230 toneladas, con gran diversidad floral (SIACON, 2023).

En este sentido, los objetivos del presente estudio fueron: 1) Analizar el impacto del incremento de la temperatura ambiental en la morfometría de abejas obreras de *A. mellifera* y 2) Identificar zonas potenciales para la apicultura en la Comarca Lagunera mediante el modelado de nicho ecológico ante proyecciones de cambio climático. El cumplimiento de estos objetivos tuvo como producto la redacción de dos artículos científicos que aportan evidencia sobre el impacto de la temperatura en la morfometría de *A. mellifera* y la identificación de zonas potenciales para la apicultura en la Comarca Lagunera ante escenarios de cambio climático.

1.2 JUSTIFICACIÓN

Las evidencias del potencial impacto del incremento de la temperatura a causa del calentamiento global sobre *Apis mellifera* y la apicultura son cada vez más concretas. Por lo cual, se expone la necesidad de efectuar proyectos de investigación que evalúen y sustenten la problemática. Del mismo modo, es necesario analizar los posibles impactos de las variaciones ambientales causadas por el cambio climático en regiones específicas con base a escenarios de cambio climático desde un enfoque de nicho ecológico. Especialmente en la Comarca Lagunera tratándose de un ecosistema árido, los cuales son regiones catalogadas y descritas como entornos ambientales frágiles y altamente susceptibles a las variaciones climáticas (Becerra-López et al., 2017; Naorem et al., 2023).

Por lo cual, es necesario evaluar el impacto de la temperatura ambiental en *Apis mellifera* y a su vez, se pretende identificar zonas potenciales para la apicultura en la Comarca Lagunera bajo el enfoque de nicho ecológico utilizando los modelos correlativos y mecanicistas en base a variables bioclimáticas del clima actual y variables bioclimáticas de proyecciones futuras con la finalidad de analizar la vulnerabilidad de la especie.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general

Evaluar el impacto del incremento de la temperatura ambiental en *Apis mellifera* e identificar zonas potenciales para la apicultura en la Comarca Lagunera.

1.3.2 Objetivos específicos

Analizar el impacto del incremento de la temperatura ambiental en la morfometría de abejas obreras de *A. mellifera*.

Identificar zonas potenciales para la apicultura en la Comarca Lagunera mediante el modelado de nicho ecológico ante proyecciones de cambio climático.

1.4 HIPÓTESIS GENERAL

Ha: El incremento de la temperatura ambiental afecta de manera negativa la morfometría y disponibilidad de hábitat de abejas obreras de *A. mellifera* en la comarca lagunera.

1.5 LIERATURA CITADA

- Ali, M. A. M. (2011). Comparative study for evaluating two honey bee races, *Apis mellifera jementica* (indigenous race) and *Apis mellifera carnica* (carniolan race) in brood production, population development and foraging activity under the environmental conditions of the central region of the Kingdom of Saudi Arabia. *Annals of Agricultural Sciences*, 56(2), 127-134. <https://doi.org/10.1016/j.aoas.2011.07.006>
- Arribas, P., Abellán, P., Velasco, J., Bilton, D. T., Lobo, J. M., Millán, A., & Sánchez-Fernández, D. (2012). La vulnerabilidad de las especies frente al cambio climático, un reto urgente para la conservación de la biodiversidad. *Ecosistemas*, 21(3), 79-84. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2012.21-3.10>
- Beaugrand, G., & Kirby, R. R. (2018). How do marine pelagic species respond to climate change? Theories and observations. *Annual Review of Marine Science*, 10(1), 169-197.
- Becerra-López, J. L., Ramírez-Bautista, A., Romero-Méndez, U., Pavón, N. P., & Sánchez-Rojas, G. (2017). Effect of climate change on halophytic grasslands loss and its impact in the viability of *Gopherus flavomarginatus*.

- Baena-Díaz, F., Chévez, E., Ruiz de la Merced, F., & Porter-Bolland, L. (2022). *Apis mellifera* en México: producción de miel, flora melífera y aspectos de polinización. Revisión. *Revista mexicana de ciencias pecuarias*, 13(2), 525-548. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v13i2.5960>.
- Bozinovic, F., & Cavieres, L. (2019). La vulnerabilidad de los organismos al cambio climático: rol de la fisiología y la adaptación. Santiago: Pontificia Universidad Católica de Chile. Facultad de Ciencias Biológicas. *Center of Applied Ecology and Sustainability (CAPES) y Universidad de Concepción Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas. Instituto de Ecología y Biodiversidad (IEB)*.
- Elith*, J., H. Graham*, C., P. Anderson, R., Dudík, M., Ferrier, S., Guisan, A., ... & E. Zimmermann, N. (2006). Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*, 29(2), 129-151.
- Gao, J., Barzel, B., & Barabási, A. L. (2016). Universal resilience patterns in complex networks. *Nature*, 530(7590), 307-312.
- Garibaldi, L. A., & Paritsis, J. (2012). Cambio climático e insectos herbívoros. *Ciencia Hoy*; 22 (129); 45-53. <http://rid.unrn.edu.ar/handle/20.500.12049/3320>.
- Garry, S., Parada Gómez, Á. M., & Salido Marcos, J. (2017). Incorporación de mayor valor en la cadena de la miel y productos derivados de la colmena en el Pacífico Central, *Costa Rica*.
- Gebremedhn, H., Tadesse, A., & Belay, T. (2014). Relating climatic factors to foraging behavior of honeybees (*Apis mellifera*) during blooming period of *Guizotia abyssinica* (LF). *Livestock Research for Rural Development*, 26(4), 2-7. <http://www.lrrd.org/lrrd26/4/haft26060.html>.
- Gómez-Leyva, J. F., May-Esquivel, F., Vázquez-Hernández, L., Gallegos-González, M., Catzím-Rojas, F. J., & Payro-De la Cruz, E. (2022). Diagnóstico de la apicultura, agroecosistemas y africanización de colonias

- de *Apis mellifera*, en Comalcalco, Tabasco, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 9(1). <https://doi.org/10.19136/era.a9n1.3158>
- González Elizondo, M., Jurado Ybarra, E., González Elizondo, S., Aguirre Calderón, Ó. A., Jiménez Pérez, J., & Návar Cháidez, J. D. J. (2003). Cambio climático mundial: origen y consecuencias. *Ciencia uanl*, 6(3). <http://eprints.uanl.mx/id/eprint/1287>.
- Guisan, A., & Zimmermann, N. E. (2000). Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological modelling*, 135(2-3), 147-186.
- Hernández, Y. (2020). Cambio climático: causas y consecuencias. *Renovat: Revista de Estudios Interdisciplinarios en Ciencias Sociales, Tecnología e Innovación*, 4(1), 38-53. ISSN: 2619-2896.
- José, D. P. C., & Alarcón-Hincapié, C. J. (2016). El efecto del cambio climático sobre las zonas áridas y semiáridas de Colombia. In *Материалы Международной конференции «ИнтерКарто/ИнтерГИС»* (Vol. 1, No. 22, pp. 56-62).
- Kearney, M. (2006). Habitat, environment and niche: what are we modelling?. *Oikos*, 115(1), 186-191.
- Li, X., Ma, W., Shen, J., Long, D., Feng, Y., Su, W., ... & Jiang, Y. (2019). Tolerance and response of two honeybee species *Apis cerana* and *Apis mellifera* to high temperature and relative humidity. *PLoS One*, 14(6), e0217921. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0217921>.
- Malhi, Y., Franklin, J., Seddon, N., Solan, M., Turner, M. G., Field, C. B., & Knowlton, N. (2020). Climate change and ecosystems: threats, opportunities and solutions. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 375(1794), 20190104.
- Melo-Merino, S. M., Reyes-Bonilla, H., & Lira-Noriega, A. (2020). Ecological niche models and species distribution models in marine environments: A literature review and spatial analysis of evidence. *Ecological Modelling*, 415, 108837.
- Mendizábal, F. (2005). Manuales Esenciales de Abejas. 1ra edición, *Editorial Albatros*, Buenos Aires.

- Miño, L. D. L. M. (2019). Producción apícola en la provincia de Corrientes. *In V Congreso Nacional de Derecho Agrario Provincial* (Corrientes, 3 y 4 de junio de 2019).
- Naorem, A., Jayaraman, S., Dang, Y. P., Dalal, R. C., Sinha, N. K., Rao, C. S., & Patra, A. K. (2023). Soil constraints in an arid environment—challenges, prospects, and implications. *Agronomy*, 13(1), 220.
- Onoh, U. C., Ogunade, J., Owoeye, E., Awakessien, S., & Asomah, J. K. (2024). Impact of climate change on biodiversity and ecosystems services. *IIARD Int J Geogr Environ Manag*, 10, 77-93.
- Pacheco, G. A. B., & Hernández, R. (2019). Cambio climático algunos aspectos a considerar para la supervivencia del ser vivo: revisión sistemática de la literatura. *Revista cuidarte*, 10(3).
- Papa, G., Maier, R., Durazzo, A., Lucarini, M., Karabagias, I. K., Plutino, M., ... & Negri, I. (2022). The honey bee *Apis mellifera*: An insect at the interface between human and ecosystem health. *Biology*, 11(2), 233.
- Pörtner, H. O., Roberts, D. C., Adams, H., Adler, C., Aldunce, P., Ali, E., ... & Ibrahim, Z. Z. (2022). Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability (p. 3056). *Geneva, Switzerland*: IPCC.
- Reddy, P. V., Verghese, A., & Rajan, V. V. (2012). Potential impact of climate change on honeybees (*Apis spp.*) and their pollination services. *Pest Management in Horticultural Ecosystems*, 18(2), 121-127. ISSN: 0971-6831.
- Richardson, K. (2023). Beekeeping role in enhancing food security and environmental public health. *Health Economics and Management Review*, 4(4), 69-79.
- Roy, D., Debnath, P., Mondal, D., & Sarkar, P. (2018). Colony collapse disorder of honey bee: A neoteric ruction in global apiculture. *Current Journal of Applied Science and Technology*, 26(3), 1-12. DOI: 10.9734/CJAST/2018/38218.

Samé, L. R., & Durán, M. G. (2018). El cambio climático: sus efectos a nivel mundial y su regulación en el derecho internacional. *Medio Ambiente & Derecho: Revista electrónica de derecho ambiental*, (33), 3.

CAPITULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 El rol ecológico de *Apis mellifera* y la vulnerabilidad de los ecosistemas ante el cambio climático

La abeja *Apis mellifera* es un agente clave en la provisión de servicios ecosistémicos, particularmente en la polinización, proceso que incide directamente en la productividad agrícola y en la conservación de la biodiversidad vegetal (Vanbergen & Insect Pollinators Initiative, 2013; Hristov et al., 2020). Sin embargo, el cambio climático amenaza su supervivencia al alterar la fenología, el hábitat y la distribución de especies, comprometiendo su papel ecológico y económico esencial (Mooney et al., 2009; Iler et al., 2021).

La biodiversidad, entendida como la totalidad y variabilidad de organismos vivos en un ecosistema, sustenta funciones ecológicas críticas y servicios ambientales esenciales para la vida humana (Ogunkunle et al., 2019; Díaz & Malhi, 2022). El cambio climático altera las condiciones ambientales necesarias para la supervivencia de muchas especies, provocando desplazamientos, extinciones locales y disrupciones en las interacciones ecológicas (Upadhyay, 2020; Fisher et al., 2021). La disminución de polinizadores como *A. mellifera* debilita la funcionalidad de los ecosistemas, afectando la provisión de alimentos, la regulación climática y la resiliencia ecológica (Oliver et al., 2015; Staples, 2023).

2.2 Cambio climático y calentamiento global

El cambio climático es una de las principales causas de la pérdida del medio ambiente, siendo una amenaza para el futuro de nuestro planeta (Piguet, 2022).

La extracción de recursos naturales y el uso de combustibles fósiles han sido la columna vertebral de los sistemas económicos globales, y la urbanización, la intensificación de la agricultura y otros cambios en el uso de la tierra han prevalecido sobre la forestación, lo que ha llevado a un cambio ambiental generalizado (Wang et al., 2021).

En consecuencia, a medida que aumenta la concentración de gases de efecto invernadero, también lo hace la temperatura de la atmósfera, y el cambio climático aumenta la temperatura (Röck et al., 2020). Aproximadamente 137 especies de plantas, animales e invertebrados sensibles a la temperatura se extinguen diariamente debido al calentamiento global (Sahney et al., 2010). Las emisiones de GEI (Gases de Efecto Invernadero) alcanzarán los 1340 millones de toneladas anuales en 2030 y los 56,000 millones de toneladas en 2050 si se mantiene el escenario. Así, entre 2036 y 2100 la atmósfera aumentará 3.6 y 4.05 °C, lo suficiente para acabar con la gran mayoría de las especies sensibles a la temperatura (Blunden y Arndt, 2019).

2.3 Insectos: Organismos ectotermos

Los insectos desempeñan un papel fundamental en los ecosistemas terrestres, y al ser pequeños ectotermos, su biología está profundamente influenciada por la temperatura ambiental (Colinet et al., 2015). Esta determina aspectos clave como la supervivencia, la dinámica de sus poblaciones y su distribución geográfica (Angilletta, 2009), lo que hace que sus respuestas al cambio climático sean particularmente sensibles (Bauerfeind & Fischer, 2014).

2.4 *Apis mellifera*

Apis mellifera Linnaeus (1758), conocida como la abeja melífera, es un insecto eusocial, (que presenta el nivel más complejo de la organización social animal) (Mikhailova et al., 2024) destacado por su importante papel en la polinización, un servicio ecosistémico clave para mantener la biodiversidad vegetal y mejorar la

calidad de frutas y cultivos (Papa et al., 2022). Las abejas melíferas tienen colonias grandes, compuestas por decenas de miles de individuos, presentan polimorfismo entre las castas reproductivas y obreras, siendo estas últimas de bajo potencial reproductivo (Smith et al., 2016).

2.4.1 Estructura social: castas de abejas melíferas

Las abejas melíferas presentan tres castas principales: zánganos, reinas y obreras, cada una con roles específicos dentro de la colonia. Los *zánganos*, que son los machos de la especie, se encargan de transmitir los genes de la colonia al aparearse con reinas de otras colmenas. Las *reinas*, como hembras reproductoras, son las únicas responsables de producir la descendencia en la colmena durante la mayor parte del ciclo de vida de la colonia. Por otro lado, las *obreras*, que generalmente son hembras no reproductivas y de menor tamaño físico, están especializadas en recolectar polen y néctar, además de encargarse del cuidado de la cría, el mantenimiento y defensa de la colmena (Mortensen et al., 2022).

Las abejas obreras no se limitan a una única tarea; en cambio, asumen diferentes roles dentro de la colonia siguiendo un orden predecible basado en su edad. Este proceso se conoce como polietismo temporal o polietismo por edad y, en consecuencia, dentro de las colonias hay castas de obreras temporales. (Johnson, 2008).

Las castas de obreras de A. mellifera son las siguientes:

Las *nodrizas* se encargan de alimentar y cuidar a las crías, así como de atender a la reina y a otros miembros de la colmena. Las *obreras del nido* realizan tareas intranidales, como construir y mantener los panales, ventilar la colmena, procesar el néctar en miel, almacenar miel y polen, entre otras actividades esenciales. Por su parte, las *buscadoras de alimento* asumen tareas extranidales, que consiste en la recolección de néctar, polen y agua para sustentar a la colonia (Seeley, 1982).

2.5 Apicultura en México y la Comarca lagunera

La abeja melífera, *Apis mellifera*, desempeña un papel crucial tanto ecológica como socialmente en México. Su presencia en el país se vincula a diversos procesos históricos que se remontan a las culturas mesoamericanas y a la época colonial, específicamente entre los años 1760 y 1770, cuando fue introducida por los colonizadores españoles (Negrín & Santos, 2016).

Aunque la abeja melífera ha estado presente en México desde la época colonial, no fue hasta mediados del siglo XX que la apicultura adquirió relevancia económica y productiva (de Ayala & Ix, 2018). Desde su llegada al continente, diversas variedades de *A. mellifera* se han establecido en prácticamente toda América. En las zonas cálidas, la mayoría de estas abejas están africanizadas (evento de introducción, cruce e invasión de razas africanas con las europeas y posterior expansión (Guzman-Novoa et al., 2020)), resultado de un proceso que se ha desarrollado durante más de medio siglo (Guzmán-Novoa et al., 2011).

México se encuentra entre los diez mayores productores y exportadores de miel en el mundo (Gómez-Leyva et al., 2022). La apicultura en el país genera una producción anual cercana a las 58,000 toneladas de miel (SIACON, 2023). En cuanto a la exportación, se reporta un promedio anual de 33 mil toneladas, exportando principalmente a Alemania y el Reino Unido de Gran Bretaña (SADER, 2020).

En la Comarca Lagunera se producen anualmente más de 230 toneladas de miel, gracias al trabajo de 162 apicultores que gestionan alrededor de 8,600 colmenas activas. Cuando las condiciones climáticas y de floración son favorables, se obtienen principalmente tres tipos de miel: ámbar, ámbar oscura y ámbar clara, provenientes en su mayoría de flores de aceitilla, mezquite, alfalfa y pinabete (SIACON, 2023).

2.6 Variables ambientales que afectan a *A. mellifera*

La especie *Apis mellifera* necesita mantener temperaturas específicas dentro de la colmena, entre 34°C y 35°C, para garantizar un desarrollo óptimo (Le Conte & Navajas, 2008). Por ello, la temperatura ambiental es considerado el factor abiótico más relevante, ya que influye directamente en el desarrollo adecuado de las larvas y, en consecuencia, en los comportamientos y actividades de la colmena (Mendizabal, 2005; Ali, 2011).

Reddy et al. (2012) demostraron que la subespecie *Apis mellifera florare* reduce su actividad de recolección de polen cuando las temperaturas superan los 32°C. De forma similar, Gebremedhn et al. (2014) reportaron una respuesta semejante en *Apis mellifera* al estudiar su comportamiento en cultivos de *Guizotia abyssinica* bajo condiciones térmicas elevadas. Por otro lado, Li et al. (2019) demostraron que el calor extremo y la humedad perjudican tanto a *Apis mellifera* como a *Apis cerana*, al aumentar la pérdida de agua y generar estrés oxidativo en estos polinizadores.

2.7 Conceptos básicos y aplicaciones del modelo de nicho ecológico

La distribución geográfica de una especie es el resultado de múltiples factores que actúan de manera simultánea en diferentes escalas espaciales y temporales (Peterson et al., 2015). Para estimarla, existen diversos métodos basados en el concepto de nicho ecológico, los cuales permiten inferir tanto la distribución potencial como la realizada de una especie (Peterson & Soberón, 2012). No obstante, el término “nicho” agrupa distintas interpretaciones bajo una misma denominación (Peterson et al., 2011), por lo que es fundamental definir con precisión qué tipo de nicho se desea estimar (Soberón, 2007).

Grinnell (1917) definió el nicho como los requerimientos climáticos y de hábitat que permiten la persistencia de una especie en un área determinada. Elton (1927)

lo conceptualizó como el papel funcional de una especie dentro de una comunidad. Posteriormente, Hutchinson (1957) integró ambas visiones al definir el nicho como un hipervolumen de variables ambientales que permiten la supervivencia de una especie, diferenciando entre nicho fundamental y nicho realizado. Además, señaló que las especies pueden modificar las variables de su propio nicho, lo que hace necesaria su distinción (Hutchinson, 1978).

En este contexto, Soberón (2007) y Hutchinson (1978) distinguieron dos tipos de variables que conforman el nicho: las scenopoéticas, cuya dinámica no puede ser modificada por la especie (por ejemplo, la temperatura y la topografía), y que permiten estimar el nicho Grinnelliano; y las bionómicas, que sí pueden ser modificadas por la especie (como la disponibilidad de alimento), asociadas al nicho Eltoniano. Aunque comprender la interacción entre ambos tipos de nicho es clave para mejorar las predicciones de distribución, esta integración representa retos metodológicos significativos (Peterson et al., 2011).

Para estimar el nicho ecológico de una especie, se emplean principalmente tres enfoques: mecanicistas, correlativos y basados en procesos. Los métodos mecanicistas determinan las tolerancias fisiológicas mediante experimentación, aunque suelen ser costosos y poco aplicables a especies grandes (Kearney & Porter, 2009). Los métodos correlativos, más comunes, relacionan registros de presencia con variables ambientales mediante algoritmos como Maxent, permitiendo proyectar el nicho en el espacio geográfico (Elith et al., 2006; Peterson et al., 2015). Los enfoques basados en procesos combinan ambos métodos e incorporan hipótesis sobre dispersión y variables bionómicas como competencia o depredación (Dormann et al., 2012).

2.8 LITERATURA CITADA

Ali, M. A. M. (2011). Comparative study for evaluating two honey bee races, *Apis mellifera jementica* (indigenous race) and *Apis mellifera carnica* (carniolan race) in brood production, population development and foraging activity under the

- environmental conditions of the central region of the Kingdom of Saudi Arabia. *Annals of Agricultural Sciences*, 56(2), 127-134. <https://doi.org/10.1016/j.aoas.2011.07.006>
- Angilletta Jr, M. J. (2009). Thermal adaptation: a theoretical and empirical synthesis, UK: Oxford Univ. Press. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780198570875.001.1>.
- Arribas, P., Abellán, P., Velasco, J., Bilton, D. T., Lobo, J. M., Millán, A., & Sánchez-Fernández, D. (2012). La vulnerabilidad de las especies frente al cambio climático, un reto urgente para la conservación de la biodiversidad. *Ecosistemas*, 21(3), 79-84. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2012.21-3.10>
- Avni, Y., Porat, N., Plakht, J., & Avni, G. (2006). Geomorphic changes leading to natural desertification versus anthropogenic land conservation in an arid environment, the Negev Highlands, Israel. *Geomorphology*, 82(3-4), 177-200.
- Baena-Díaz, F., Chévez, E., Ruiz de la Merced, F., & Porter-Bolland, L. (2022). *Apis mellifera* en México: producción de miel, flora melífera y aspectos de polinización. Revisión. *Revista mexicana de ciencias pecuarias*, 13(2), 525-548. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v13i2.5960>
- Barragán Barrera, H. N. (2020). Efectos de la elevación sobre la alometría sensorial en la abeja de la miel, *Apis mellifera* (Doctoral dissertation, Universidad del Rosario).
- Bauerfeind, S. S., & Fischer, K. (2014). Simulating climate change: temperature extremes but not means diminish performance in a widespread butterfly. *Population Ecology*, 56, 239-250.
- Beaugrand, G., & Kirby, R. R. (2018). How do marine pelagic species respond to climate change? Theories and observations. *Annual Review of Marine Science*, 10(1), 169-197.
- Becerra-López, J. L., Ramírez-Bautista, A., Romero-Méndez, U., Pavón, N. P., & Sánchez-Rojas, G. (2017). Effect of climate change on halophytic grasslands loss and its impact in the viability of *Gopherus flavomarginatus*. *Nature Conservation*, 21, 39-55. <https://doi.org/10.3897/natureconservation.21.13614>
- Beltrán-Telles, A., Morera-Hernández, M., López-Monteagudo, F. E., & Villela-Varela, R. (2017). Prospectiva de las energías eólica y solar fotovoltaica en la producción de energía eléctrica. *CienciaUAT*, 11(2), 105-117.

- Blunden, J., & Arndt, D. S. (Eds.). (2020). State of the Climate in 2019. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 101(8), S1-S429.
- Bozinovic, F., & Cavieres, L. (2019). La vulnerabilidad de los organismos al cambio climático: rol de la fisiología y la adaptación. *Santiago: Pontificia Universidad Católica de Chile. Facultad de Ciencias Biológicas. Center of Applied Ecology and Sustainability (CAPES) y Universidad de Concepción Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas. Instituto de Ecología y Biodiversidad (IEB).*
- Colinet, H., Sinclair, B. J., Vernon, P., & Renault, D. (2015). Insects in fluctuating thermal environments. *Annual review of entomology*, 60(1), 123-140.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2018). Las zonas áridas son más que desierto. (fecha de consulta: abril 13, 2023). (<https://www.gob.mx/conafor/articulos/las-zonas-aridas-son-mas-que-desierto?idiom=es>)
- de Ayala, M. P., Roberto, L., & Ix, C. (2018). Apicultura manejo, nutrición, sanidad y flora apícola. Universidad Autónoma de Campeche.
- Díaz, S., & Malhi, Y. (2022). Biodiversity: Concepts, patterns, trends, and perspectives. *Annual Review of Environment and Resources*, 47(1), 31-63.
- Dormann, C. F., Schymanski, S. J., Cabral, J., Chuine, I., Graham, C., Hartig, F., ... & Singer, A. (2012). Correlation and process in species distribution models: bridging a dichotomy. *Journal of Biogeography*, 39(12), 2119-2131.
- Elith*, J., H. Graham*, C., P. Anderson, R., Dudík, M., Ferrier, S., Guisan, A., ... & E. Zimmermann, N. (2006). Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*, 29(2), 129-151.
- Elton, C. (1927). *Animal Ecology*. London, Sidgwick and Jackson. 1946. Competition and the structure of animal communities. *J. Anim. Ecol.*
- Feng, S., & Fu, Q. (2013). Expansion of global drylands under a warming climate. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(19), 10081-10094. (<https://doi.org/10.5194/acp-13-10081-2013>).
- Fisher, D. N., Kilgour, R. J., Siracusa, E. R., Foote, J. R., Hobson, E. A., Montiglio, P. O., ... & Wice, E. W. (2021). Anticipated effects of abiotic environmental change on intraspecific social interactions. *Biological Reviews*, 96(6), 2661-2693.

- Flores, J. M., Gil-Lebrero, S., Gámiz, V., Rodríguez, M. I., Ortiz, M. A., & Quiles, F. J. (2019). Effect of the climate change on honey bee colonies in a temperate Mediterranean zone assessed through remote hive weight monitoring system in conjunction with exhaustive colonies assessment. *Science of the Total Environment*, 653, 1111–1119. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.004>
- Gao, J., Barzel, B., & Barabási, A. L. (2016). Universal resilience patterns in complex networks. *Nature*, 530(7590), 307-312.
- Garibaldi, L. A., & Paritsis, J. (2012). Cambio climático e insectos herbívoros. *Ciencia Hoy*; 22 (129); 45-53. <http://rid.unrn.edu.ar/handle/20.500.12049/3320>
- Garry, S., Parada Gómez, Á. M., & Salido Marcos, J. (2017). Incorporación de mayor valor en la cadena de la miel y productos derivados de la colmena en el Pacífico Central, Costa Rica.
- Gebremedhn, H., Tadesse, A., & Belay, T. (2014). Relating climatic factors to foraging behavior of honeybees (*Apis mellifera*) during blooming period of *Guizotia abyssinica* (LF). *Livestock Research for Rural Development*, 26(4), 2-7. <http://www.lrrd.org/lrrd26/4/haft26060.html>
- Gérard, M., Vanderplanck, M., Wood, T., & Michez, D. (2020). Global warming and plant–pollinator mismatches. *Emerging topics in life sciences*, 4(1), 77-86. <https://doi.org/10.1042/ETLS20190139>
- Gómez-Leyva, J. F., May-Esquivel, F., Vázquez-Hernández, L., Gallegos-González, M., Catzím-Rojas, F. J., & Payro-De la Cruz, E. (2022). Diagnóstico de la apicultura, agroecosistemas y africanización de colonias de *Apis mellifera*, en Comalcalco, Tabasco, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 9(1). <https://doi.org/10.19136/era.a9n1.3158>
- González Elizondo, M., Jurado Ybarra, E., González Elizondo, S., Aguirre Calderón, Ó. A., Jiménez Pérez, J., & Návar Cháidez, J. D. J. (2003). Cambio climático mundial: origen y consecuencias. *Ciencia uanl*, 6(3). <http://eprints.uanl.mx/id/eprint/1287>
- Grinnell, J. (1917). The niche-relationships of the California Thrasher. *The Auk*, 34(4), 427-433.

- Guisan, A., & Zimmermann, N. E. (2000). Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological modelling*, 135(2-3), 147-186.
- Guzmán-Novoa, E., Benítez, A. C., Montaña, L. G. E., & Novoa, G. G. (2011). Colonización, impacto y control de las abejas melíferas africanizadas en México. *Veterinaria México*, 42(2), 149-178.
- Guzman-Novoa, E., Morfin, N., De la Mora, A., Macías-Macías, J. O., Tapia-González, J. M., Contreras-Escareño, F., ... & Quezada-Euán, J. J. G. (2020). The process and outcome of the Africanization of honey bees in Mexico: Lessons and future directions. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 8, 608091.
- Hallett, James G., and Samira AS Omar. "Restoration ecology of arid lands (RE-AL)." *Restoration Ecology* 28 (2020): A3-A4.
- Hernández, Y. (2020). Cambio climático: causas y consecuencias. *Renovat: Revista de Estudios Interdisciplinarios en Ciencias Sociales, Tecnología e Innovación*, 4(1), 38-53. ISSN: 2619-2896.
- Hristov, P., Neov, B., Shumkova, R., & Palova, N. (2020). Significance of apoidea as main pollinators. ecological and economic impact and implications for human nutrition. *Diversity*, 12(7), 280.
- Huang, J., Li, Y., Fu, C., Chen, F., Fu, Q., Dai, A., ... & Wang, G. (2017). Dryland climate change: Recent progress and challenges. *Reviews of Geophysics*, 55(3), 719-778. <https://doi.org/10.1002/2016RG000550>
- Hutchinson, G. E. (1957). Concluding remarks—cold spring harbor symposia on quantitative biology. Reprinted in 1991: classics in theoretical biology. *Bulletin of Mathematical Biology*, 53(1507), 193-213.
- Iler, A. M., CaraDonna, P. J., Forrest, J. R., & Post, E. (2021). Demographic consequences of phenological shifts in response to climate change. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 52(1), 221-245.
- Johnson, B. R. (2008). Within-nest temporal polyethism in the honey bee. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 62, 777-784.
- José, D. P. C., & Alarcón-Hincapié, C. J. (2016). El efecto del cambio climático sobre las zonas áridas y semiáridas de Colombia. In *Материалы Международной конференции «ИнтерКарто/ИнтерГИС»* (Vol. 1, No. 22, pp. 56-62).

- Kearney, M. (2006). Habitat, environment and niche: what are we modelling?. *Oikos*, 115(1), 186-191.
- Kearney, M., & Porter, W. (2009). Mechanistic niche modelling: combining physiological and spatial data to predict species' ranges. *Ecology letters*, 12(4), 334-350.
- Kissling, W. D., Rahbek, C., & Böhning-Gaese, K. (2007). Food plant diversity as broad-scale determinant of avian frugivore richness. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 274(1611), 799-808.
- Koltowski, Z. (2002). Beekeeping value of recently cultivated winter rapeseed cultivars. *Journal of Apicultural Science*, 46(2).
- Kriegler E., N. Bauer, A. Popp, F. Humpenöder, M. Leimbach, J. Strefler, L. Baumstark, B. L. Bodirsky, J. Hilare, D. Klein, I. Mouratiadou, I. Weindl, C. Bertram, J. P. Dietrich, G. Luderer, M. Pehl, R. Pietzcker, F. Piontek, H. Lotze-Campen, A. Biewald, M. Bonsch, A. Giannousakis, U. Kreidenweis, C. Müller, S. Rolinski, A. Schultes, J. Schwanitz, M. Stevanovic, K. Calvin, J. Emmerling, S. Fujimori & O. Edenhofer (2017) Fossil-fueled development (SSP5): an energy and resource intensive scenario for the 21st century. *Global Environmental Change* 42:297–315. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2016.05.015.
- Langowska, A., Zawilak, M., Sparks, T. H., Glazaczow, A., Tomkins, P. W., & Tryjanowski, P. (2017). Long-term effect of temperature on honey yield and honeybee phenology. *International journal of biometeorology*, 61, 1125-1132. <https://doi.org/10.1007/s00484-016-1293-x>
- Le Conte, Y., & Navajas, M. (2008). Climate change: impact on honey bee populations and diseases. *Revue Scientifique et Technique-Office International des Epizooties*, 27(2), 499-510. PMID: 18819674.
- Lever, J. J., van Nes, E. H., Scheffer, M., & Bascompte, J. (2014). The sudden collapse of pollinator communities. *Ecology letters*, 17(3), 350-359. <https://doi.org/10.1111/ele.12236>.
- Li, X., Ma, W., Shen, J., Long, D., Feng, Y., Su, W., ... & Jiang, Y. (2019). Tolerance and response of two honeybee species *Apis cerana* and *Apis mellifera* to high temperature and relative humidity. *PLoS One*, 14(6), e0217921. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0217921>.

- Malhi, Y., Franklin, J., Seddon, N., Solan, M., Turner, M. G., Field, C. B., & Knowlton, N. (2020). Climate change and ecosystems: threats, opportunities and solutions. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 375(1794), 20190104.
- Melo-Merino, S. M., Reyes-Bonilla, H., & Lira-Noriega, A. (2020). Ecological niche models and species distribution models in marine environments: A literature review and spatial analysis of evidence. *Ecological Modelling*, 415, 108837.
- Mendizábal, F. (2005). Manuales Esenciales de Abejas. 1ra edición, *Editorial Albatros, Buenos Aires*.
- Mikhailova, A. A., Rinke, S., & Harrison, M. C. (2024). Genomic signatures of eusocial evolution in insects. *Current Opinion in Insect Science*, 61, 101136.
- Miño, L. D. L. M. (2019). Producción apícola en la provincia de Corrientes. In *V Congreso Nacional de Derecho Agrario Provincial (Corrientes, 3 y 4 de junio de 2019)*.
- Montaño, N. M., Ayala, F., Bullock, S. H., Briones, O., García Oliva, F., García Sánchez, R., ... & Yépez, E. (2016). Almacenes y flujos de carbono en ecosistemas áridos y semiáridos de México: Síntesis y perspectivas. *Terra Latinoamericana*, 34(1), 39-59. ISSN 2395-8030.
- Mooney, H., Larigauderie, A., Cesario, M., Elmquist, T., Hoegh-Guldberg, O., Lavorel, S., ... & Yahara, T. (2009). Biodiversity, climate change, and ecosystem services. *Current opinion in environmental sustainability*, 1(1), 46-54.
- Mortensen, A. N., Smith, B., Ellis, J. D., & Ramos, M. P. (2022). La Organización Social de las Abejas Melíferas: ENY-176/IN1373, 10/2022. *EDIS*, 2022(5).
- Naimi, B., & Araújo, M. B. (2016). sdm: a reproducible and extensible R platform for species distribution modelling. *Ecography*, 39(4), 368-375.
- Naorem, A., Jayaraman, S., Dang, Y. P., Dalal, R. C., Sinha, N. K., Rao, C. S., & Patra, A. K. (2023). Soil constraints in an arid environment—challenges, prospects, and implications. *Agronomy*, 13(1), 220.
- Negrín, E., & Santos, L. E. S. (2016). Abejas nativas, señoras de la miel. Patrimonio cultural en el estado de Campeche. *Revista Iberoamericana de las Ciencias Sociales y Humanísticas: RICSH*, 5(9), 162-185.

- Ogunkunle, T., Adewumi, A., & Adepoju, A. (2019). Biodiversity: over-exploited but underutilized natural resource for human existence and economic development. *Environment & Ecosystem Science (EES)*, 3(1), 26-34.
- Oliver, T. H., Isaac, N. J., August, T. A., Woodcock, B. A., Roy, D. B., & Bullock, J. M. (2015). Declining resilience of ecosystem functions under biodiversity loss. *Nature communications*, 6(1), 10122.
- Onoh, U. C., Ogunade, J., Owoeye, E., Awakessien, S., & Asomah, J. K. (2024). Impact of climate change on biodiversity and ecosystems services. *IIARD Int J Geogr Environ Manag*, 10, 77-93.
- Orjuela-Parrado, R.L. (2018). Variación morfométrica de abejas africanizadas en un gradiente altitudinal de la Cordillera Oriental (Colombia). *Revista de Biología Tropical*, 55(3-4):931-941.
- Pacheco, G. A. B., & Hernández, R. (2019). Cambio climático algunos aspectos a considerar para la supervivencia del ser vivo: revisión sistemática de la literatura. *Revista cuidar*, 10(3).
- Papa, G., Maier, R., Durazzo, A., Lucarini, M., Karabagias, I. K., Plutino, M., ... & Negri, I. (2022). The honey bee *Apis mellifera*: An insect at the interface between human and ecosystem health. *Biology*, 11(2), 233.
- Pearson, R. G., & Dawson, T. P. (2003). Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful?. *Global ecology and biogeography*, 12(5), 361-371.
- Peterson, A. T., Soberón, J., Pearson, R. G., Anderson, R. P., Martínez-Meyer, E., Nakamura, M., & Araújo, M. B. (2011). Ecological niches and geographic distributions (MPB-49). *Princeton University Press*.
- Peterson, A. T., & Soberón, J. (2012). Species distribution modeling and ecological niche modeling: getting the concepts right. *Natureza & Conservação*, 10(2), 102-107.
- Peterson, A. T., Papeş, M., & Soberón, J. (2015). Mechanistic and correlative models of ecological niches. *European Journal of Ecology*, 1(2), 28-38.
- Pierre, J. P., Díaz, C. D. J., & Le Conte, Y. (2007). Apicultura: Conocimiento de la abeja. Manejo de la Colmena, 4ta Ed. *Editorial Mundi-Prensa*.

- Piguet, E. (2022). Linking climate change, environmental degradation, and migration: An update after 10 years. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 13(1), e746.
- Pörtner, H. O., Roberts, D. C., Adams, H., Adler, C., Aldunce, P., Ali, E., ... & Ibrahim, Z. (2022). *Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability* (p. 3056). Geneva, Switzerland:: IPCC.
- Potts, S. G., Vulliamy, B., Dafni, A., Ne'eman, G., & Willmer, P. (2003). Linking bees and flowers: how do floral communities structure pollinator communities?. *Ecology*, 84(10), 2628-2642. <https://doi.org/10.1890/02-0136>
- R Core Team. 2021. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <http://www.R-project.org/> (accessed April 12, 2024).
- Reddy, P. V., Verghese, A., & Rajan, V. V. (2012). Potential impact of climate change on honeybees (*Apis* spp.) and their pollination services. *Pest Management in Horticultural Ecosystems*, 18(2), 121-127. ISSN: 0971-6831.
- Richardson, K. (2023). Beekeeping role in enhancing food security and environmental public health. *Health Economics and Management Review*, 4(4), 69-79.
- Röck, M., Saade, M. R. M., Balouktsi, M., Rasmussen, F. N., Birgisdottir, H., Frischknecht, R., ... & Passer, A. (2020). Embodied GHG emissions of buildings—The hidden challenge for effective climate change mitigation. *Applied energy*, 258, 114107.
- Roy, D., Debnath, P., Mondal, D., & Sarkar, P. (2018). Colony collapse disorder of honey bee: A neoteric ruction in global apiculture. *Current Journal of Applied Science and Technology*, 26(3), 1-12. DOI: 10.9734/CJAST/2018/38218
- Ruttner, F., Tassencourt, L., & Louveaux, J. (1978). Biometrical-statistical analysis of the geographic variability of *Apis mellifera* LI Material and methods. *Apidologie*, 9(4), 363-381
- Rzedowski, J. (1978). Vegetación de México. limusa. *México DF, México*.
- Sahney, S., Benton, M. J., & Falcon-Lang, H. J. (2010). Rainforest collapse triggered Carboniferous tetrapod diversification in Euramerica. *Geology*, 38(12), 1079-1082.

- Samé, L. R., & Durán, M. G. (2018). El cambio climático: sus efectos a nivel mundial y su regulación en el derecho internacional. *Medio Ambiente & Derecho: Revista electrónica de derecho ambiental*, (33), 3.
- Sandoz, M. A. M. (2016). Efectos del cambio climático sobre la polinización y la producción agrícola en América Tropical. *Ingeniería*, 26(1), 11-20.
- Seeley, T. D. (1982). Adaptive significance of the age polyethism schedule in honeybee colonies. *Behavioral ecology and sociobiology*, 11, 287-293.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta (SIACON), 1980-2023, consultado en, 12-04-2025.
- Sivakumar, M. V., Das, H. P., & Brunini, O. (2005). Impacts of present and future climate variability and change on agriculture and forestry in the arid and semi-arid tropics. *Increasing Climate Variability and Change: Reducing the Vulnerability of Agriculture and Forestry*, 31-72.
- Smith, M. L., Ostwald, M. M., & Seeley, T. D. (2016). Honey bee sociometry: tracking honey bee colonies and their nest contents from colony founding until death. *Insectes Sociaux*, 63, 553-563.
- Soberón, J. (2007). Grinnellian and Eltonian niches and geographic distributions of species. *Ecology letters*, 10(12), 1115-1123.
- Soberón, J., & Nakamura, M. (2009). Niches and distributional areas: concepts, methods, and assumptions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(supplement_2), 19644-19650.
- Soberón, J., Osorio-Olvera, L., & Peterson, T. (2017). Diferencias conceptuales entre modelación de nichos y modelación de áreas de distribución. *Revista mexicana de biodiversidad*, 88(2), 437-441.
- Souza, D. L., Evangelista-Rodrigues, A., Ribeiro, M. N., Padilla Álvarez, F., Farias, E. S. L., & Pereira, W. E. (2009). Análises morfométricas entre *Apis mellifera* da mesorregião do sertão paraibano. *Archivos de zootechnia*, 58(221), 65-71.
- Sparks, T. H., Górska-Zajączkowska, M., Wójtowicz, W., & Tryjanowski, P. (2011). Phenological changes and reduced seasonal synchrony in western Poland. *International Journal of Biometeorology*, 55, 447-453.
<https://doi.org/10.1007/s00484-010-0355-8>.

- Staples, B. (2023). *Please Bee-Have: A Critical Look Into Pollinator Decline & Its Negative Impacts On Our Food Security*. Braiden Staples.
- Strange, E. E., & Ayres, M. P. (2010). Climate change impacts: insects. *Encyclopedia of Life Sciences*.
- Switanek, M., Crailsheim, K., Truhetz, H., & Brodschneider, R. (2017). Modelling seasonal effects of temperature and precipitation on honey bee winter mortality in a temperate climate. *Science of the Total Environment*, 579, 1581–1587. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.178>
- University of Georgia College of Agricultural and Environmental Sciences. (n.d.). *Getting started: Honey bee biology*. University of Georgia. Recuperado el 01 de noviembre de 2024, de <https://bees.caes.uga.edu/beekeeping-resources/getting-started-topics/getting-started-honey-bee-biology.html>.
- Upadhyay, R. K. (2020). Markers for global climate change and its impact on social, biological and ecological systems: A review. *American Journal of Climate Change*, 9(03), 159.
- Vanbergen, A. J., & Insect Pollinators Initiative. (2013). Threats to an ecosystem service: pressures on pollinators. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 11(5), 251-259.
- Wang, F., Harindintwali, J. D., Yuan, Z., Wang, M., Wang, F., Li, S., ... & Chen, J. M. (2021). Technologies and perspectives for achieving carbon neutrality. *The Innovation*, 2(4).
- Zalibekov, Z. G., Mamaev, S. A., Kotenko, M. E., & Magomedov, R. A. (2020). Priorities in the development of the research strategy for arid lands of the world. *Arid Ecosystems*, 10, 171-180. <https://doi.org/10.1134/S2079096120030117>

CAPITULO 3. Evaluación del impacto del incremento de la temperatura ambiental en la morfometría de abejas obreras de *Apis mellifera*

Evaluation of the impact of increased ambient temperature on the morphometry of *Apis mellifera* worker bees

Juan Tello-Ruiz¹, Armando López-Santos^{1*}, Jorge Luis Becerra-López², Miguel Ángel Mata Espinosa¹, José Villanueva Díaz³

* Corresponding author: Armando López-Santos;

alopez@chapingo.uruza.edu.mx.

1. Programa de Posgrado en Recursos Naturales y Medio Ambiente de Zonas Áridas, Universidad Autónoma Chapingo, Apdo. Postal 8, Bermejillo, Durango, CP 35230, México.
- 2.- Laboratorio de Cambio Climático y Conservación de Recursos Naturales, Centro de Estudios Ecológicos, Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Juárez del Estado de Durango, Gómez Palacio, Durango, México.
- 3.- Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua- Suelo- Planta-Atmósfera del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (CENID RASPA INIFAP). kilómetro 6+500 margen derecha canal Sacramento. 35140 Gómez Palacio, Durango, México.

3.1 RESUMEN

En las últimas décadas, los insectos polinizadores han disminuido notablemente, en parte por el aumento de la temperatura global. Este factor influye en el desarrollo de organismos ectotérmicos como lo es la abeja *Apis mellifera*, afectando tanto su fisiología como su morfología. Por lo tanto, el objetivo del presente estudio es evaluar el impacto del incremento de la temperatura ambiental en la morfometría de abejas obreras de *A. mellifera*. Para llevar a cabo este objetivo, se sometieron individuos de *A. mellifera* a diferentes tratamientos de temperatura con la finalidad de encontrar variaciones morfométricas inducidas por los diferentes gradientes. Los resultados indicaron que las variables morfométricas analizadas se vieron significativamente afectadas al someter a los individuos a temperaturas superiores a 35°C, impactando de manera negativa el tamaño de las estructuras anatómicas de las abejas. Así mismo, se señaló que algunas estructuras relacionadas con el rendimiento de vuelo resultaron con variaciones negativas importantes. Estos resultados respaldan una nueva idea en la cual *A. mellifera* pueda manifestar una menor capacidad de vuelo como resultado de las variaciones morfométricas a causa del calentamiento global, siendo un factor determinante en los mecanismos de supervivencia y dispersión de la abeja.

Palabras clave: Abejas obreras, ectotérmicos, estructuras anatómicas, calentamiento global.

3.2 ABSTRACT

In recent decades, pollinating insects have declined significantly, partly due to rising global temperatures. This factor influences the development of ectothermic organisms such as the honeybee *Apis mellifera*, affecting both their physiology and morphology. Therefore, the aim of this study is to evaluate the impact of increased ambient temperature on the morphometry of *A. mellifera* worker bees. To achieve this objective, *A. mellifera* individuals were subjected to different temperature treatments in order to identify morphometric variations induced by the various thermal gradients. The results indicated that the morphometric variables analyzed were significantly affected when individuals were exposed to temperatures above 35°C, negatively impacting the size of the bees' anatomical structures. Furthermore, some structures related to flight performance showed notable negative variations. These findings support a new perspective in which *A. mellifera* may exhibit reduced flight capacity as a consequence of morphometric changes driven by global warming, which could be a determining factor in the species' survival and dispersal mechanisms.

Keywords: Worker bees, ectotherms, anatomical structures, global warming.

3.3 INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas los insectos polinizadores han sufrido un descenso alarmante debido a las actividades antropogénicas (Zattara & Aizen, 2021). Siendo el calentamiento global uno de los principales impulsores de este declive (Soroye et al., 2020), lo cual afecta el mantenimiento de la diversidad de plantas silvestres, la estabilidad de los ecosistemas, la producción agrícola, la seguridad alimentaria y el bienestar humano (Garibaldi et al., 2013; Potts et al., 2016).

Si bien, la temperatura tiene efectos obvios en la fisiología ectotérmica, particularmente su efecto en la tasa de reacciones bioquímicas y procesos biológicos, también impacta en la morfología ectotérmica (McDonald et al., 2018). Esto se debe principalmente a que la tasa de desarrollo y el tamaño final de las partes del cuerpo pueden verse afectados por las variaciones de la temperatura ambiente (Shingleton et al., 2009).

Sin embargo, las respuestas de las diferentes estructuras anatómicas del cuerpo del insecto podrán responder de diferente manera ante las variaciones térmicas durante el proceso de desarrollo; por ejemplo, en *Drosophila melanogaster* las alas son inusualmente plásticas térmicamente, de modo que su tamaño es mucho más sensible a los cambios en la temperatura de desarrollo que el cuerpo en su conjunto (Azevedo et al., 2002; Shingleton et al., 2009). De esta manera, comprender cómo el desarrollo de diferentes partes del cuerpo se ve afectado por la temperatura elevada en los insectos polinizadores podría ser particularmente importante para predecir los efectos que los rápidos cambios climáticos actuales y futuros tendrán en los servicios ecosistémicos que estos proporcionan (Moradinour et al., 2023).

En el caso de la abeja *Apis mellifera*, la cual es un insecto con una capacidad limitada para regular su temperatura corporal (Li et al., 2019), la temperatura ambiental es un factor abiótico determinante para su sobrevivencia, ya que influye directamente en el comportamiento de las abejas y la funcionalidad de la

colmena (Mendizabal, 2005; Ali, 2011; Simone-Finstrom et al., 2016; Stabentheiner et al., 2010; Chuda-Mickiewicz & Samborski, 2015). Sin embargo, un aspecto del ciclo de vida de *A. mellifera* que es particularmente importante analizar es su sensibilidad a las temperaturas elevadas durante la transición del desarrollo de larva a adulto.

Es por ello que la finalidad de este estudio evaluar si el aumento de la temperatura durante el proceso de desarrollo de la larva puede incidir en el tamaño de las estructuras anatómicas de las abejas obreras de *A. mellifera*. Esta información es de gran relevancia considerando que los modelos predictivos indican que para el periodo 2021-2040, existe una alta probabilidad de que la temperatura global alcance o supere los 1.5°C (Masson-Delmotte et al., 2022).

3.4 MATERIALES Y MÉTODOS

3.4.1 Ubicación geográfica del área de estudio

El apiario experimental, para el estudio, se instaló en el rancho El Carmen, perteneciente a la Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas (URUZA) de la Universidad Autónoma de Chapingo (UACH).

3.4.2 Material biológico

Para la cría de abejas obreras, se emplearon cuatro cajones de madera con una medida de 30cm x 30cm, en cada uno de los cuales se instaló una reina fecundada junto con su grupo correspondiente de abejas nodrizas y obreras. Tras la puesta de huevos por parte de las reinas, los bastidores de los cuatro cajones que contenían huevos, larvas y pupas se sometieron a distintos tratamientos de temperatura en una incubadora.

3.4.3 Diseño y conducción experimental

Para llevar a cabo este proyecto, se utilizó un diseño completamente al azar con tres repeticiones (Cuadro 1). Con este fin, se aplicaron tres tratamientos de temperatura a tres colmenas, evaluando temperaturas de 37°C, 39°C y 41°C. Además, se incluyó una cuarta colmena como grupo control, mantenida a una temperatura de 35°C, considerada óptima para el desarrollo de la colmena según Pierre, Díaz y Le Conte (2007).

Cuadro 1. Diseño experimental

Tratamiento	R1	R2	R3
T1 35°C	T1CR1	T1CR2	T1CR3
T2 37°C	T2CR1	T2CR2	T2CR3
T3 39°C	T3CR1	T3CR2	T3CR3
T4 41°C	T4CR1	T4CR2	T4CR3

T = Tratamiento; R = repetición; C = colmena;

El tamaño de la muestra por colmena se determinó mediante el cálculo para poblaciones infinitas (Zar, 1999) considerando un 95% de confiabilidad y un error del 15%, representado por la siguiente fórmula estadística.

$$n = \frac{Z^2 pq}{d^2}$$

Donde n = tamaño de muestra; Z = nivel de confianza; p = proporción aproximada (50% = 0.5); q = 1-p (1-0.5 = 0.5); d = precisión (se trabajará con un error del 15% = 0.15), tomando en cuenta esta fórmula estadística, el tamaño de muestra establecido fue de 43 abejas obreras para cada tratamiento térmico.

Cada tratamiento se realizó con tres repeticiones, considerando que la abeja *Apis mellifera* es un insecto de metamorfosis completa, cuyo desarrollo de huevo a adulto toma 21 días, seguido de un período adicional de 20 días para que la abeja comience a realizar actividades de pecoreo (Pierre, Díaz & Le Conte, 2007). Por lo tanto, los bastidores con cría fueron sometidos a los tratamientos térmicos

durante un tiempo mínimo de 41 días. Esto aseguró que trabajáramos exclusivamente con abejas obreras expuestas a los distintos tratamientos de temperatura.

3.4.4 Variables morfométricas

Las abejas obreras se seleccionaron de forma aleatoria para cada tratamiento térmico y fueron sacrificadas mediante el método de cámara letal (Gómez & Jones, 2002). Posteriormente, se conservaron en alcohol etílico al 70% para su análisis morfométrico, empleando las técnicas descritas por Ruttner (1978).

Las medidas morfométricas evaluadas, basadas en Souza et al. (2009), Orjuela (2018) y Barragán (2020), incluyeron: ancho de la cabeza (AC), largo de la cabeza (LC), longitud total (LT), longitud del tórax (LTO), longitud del abdomen (LAB), longitud de las alas anteriores (LAA), longitud de las alas posteriores (LAP) y medidas de la tercera pata (longitud del fémur (LF), longitud tibial (LTI), longitud tarsal (LTA) y anchura tarsal (ATA). Para ello, se extrajeron el ala anterior, el ala posterior y la pata trasera de cada abeja, montándolas en láminas portaobjetos cubiertas para asegurar que las estructuras estuvieran completamente planas durante la medición.

Las variaciones se midieron utilizando un microscopio digital LCD INSKAM con una magnificación de 1000x en vista frontal, y se tomaron fotografías que luego se analizaron en el programa ImageJ 13.0.6, integrado con Java 8.

3.4.5 Análisis estadístico

Los análisis estadísticos se llevaron a cabo con el programa R Project (v4.3.1). Utilizando la librería “*nortest*” (Gross y Ligges, 2015), se evaluó la normalidad de los datos obtenidos para cada variable bajo los diferentes tratamientos térmicos mencionados anteriormente. Para ello, se aplicó la prueba de Kolmogorov-Smirnov, adecuada dado que todos los tratamientos térmicos contaban con más

de 50 datos (Steinskog et al., 2007). Las pruebas de normalidad son esenciales en la investigación científica, ya que definen si los análisis posteriores deben seguir un enfoque paramétrico o no paramétrico (Zar, 1999).

Puesto que no todas las variables estudiadas presentaron valores de significancia superiores a 0.05, los análisis estadísticos subsiguientes se realizaron bajo un enfoque no paramétrico (Zar, 1999). Antes de aplicar el análisis multivariado permutado de la varianza (PERMANOVA) (Anderson, 2014), se examinó la intensidad de la relación entre las variables LTO, LAB, LAA, AC, LC, LTT, LAP, LF, LTI, LTA y ATA. Dado que no todas cumplían con el supuesto de normalidad, se empleó el coeficiente de correlación de Spearman mediante la librería “*PerformanceAnalytics*”. Las variables con una correlación igual o superior a 0.6 se consideraron redundantes, eliminándose una de ellas.

Posteriormente, se implementó el análisis PERMANOVA con las librerías devtools (Wickham et al., 2022), cluster (Maechler et al., 2013) y pairwiseAdonis (Martinez Arbizu, 2020) para identificar diferencias significativas entre los tratamientos térmicos. Además, se realizó una prueba Post-Hoc basada en el método de Bonferroni (Armstrong, 2014), adecuado para grupos de tamaños desiguales. Este método, al utilizar intervalos de confianza más estrechos, ofrece mayor sensibilidad para detectar diferencias significativas entre los grupos de interés (Zar, 1999).

3.5 RESULTADOS

Los resultados indican que las variables morfométricas mostraron una correlación menor a 0.60 lo cual indica bajos niveles de colinealidad (Cuadro 2), por lo tanto, es posible que la totalidad de las variables sean consideradas para ser analizadas a través del Análisis Multivariado Permutado de la Varianza (PERMANOVA) al no existir una fuerte dependencia entre ellas, por lo tanto, no se excluye ninguna variable morfométrica por redundancia.

Cuadro 2. Valores de correlación entre las variables morfométricas

Correlación de Variables Morfométricas											
Variable	AC	LC	LTT	LTO	LAB	LAA	LAP	LF	LTI	LTA	ATA
AC	1.000	0.018	-0.113	-0.002	0.027	0.036	0.083	-0.092	0.135	-0.006	0.036
LC	0.018	1.000	0.174	0.051	0.089	0.031	-0.097	-0.027	0.133	-0.074	0.036
LTT	-0.113	0.174	1.000	0.082	-0.111	0.030	-0.034	-0.063	-0.145	0.022	-0.013
LTO	-0.002	0.051	0.082	1.000	-0.023	0.013	-0.076	-0.013	0.035	-0.048	-0.209
LAB	0.027	0.089	-0.111	-0.023	1.000	-0.113	-0.093	-0.082	-0.021	-0.012	0.074
LAA	0.036	0.031	0.030	0.013	-0.113	1.000	0.005	0.069	0.031	0.019	-0.063
LAP	0.083	-0.097	-0.034	-0.076	-0.093	0.005	1.000	-0.052	0.083	-0.084	-0.012
LF	-0.092	-0.027	-0.063	-0.013	-0.082	0.069	-0.052	1.000	0.049	0.051	0.004
LTI	0.135	0.133	-0.145	0.035	-0.021	0.031	0.083	0.049	1.000	0.074	0.056
LTA	-0.006	-0.074	0.022	-0.048	-0.012	0.019	-0.084	0.051	0.074	1.000	-0.073
ATA	0.036	0.036	-0.013	-0.209	0.074	-0.063	-0.012	0.004	0.056	-0.073	1.000

El análisis PERMANOVA revela que existen diferencias significativas entre al menos uno de los tratamientos térmicos analizados. Esto se refleja en los valores obtenidos: un grado de libertad (Df) de 3, un coeficiente de determinación (R^2) de 0.95467, un estadístico F de 3594.2, y un valor de significancia (P) de 0.0001. El alto valor de R^2 indica que el 95.47% de la variación en los datos puede explicarse por los tratamientos térmicos, lo que refuerza la solidez de la relación entre las variables morfométricas y los tratamientos de temperatura.

Las pruebas Post-Hoc de Bonferroni (Cuadro 3) complementan este resultado al mostrar que todas las comparaciones entre los tratamientos térmicos presentaron valores de significancia menores a 0.05. Esto confirma que cada tratamiento térmico es estadísticamente distinto de los demás, lo cual sugiere que las condiciones térmicas ejercen un impacto claro y diferenciado en las variables analizadas.

Cuadro 3. Prueba Post hoc de Bonferroni entre tratamientos de temperatura

Comparaciones	Df	Suma de Cuadrados	Modelo F.	R2	Valor p.	p.adjustado
35°C vs 37 °C	1	155.436311	1596.67011	0.86182106	0.001	0.006
35 °C vs 39 °C	1	673.2341453	6628.06661	0.96281268	0.001	0.006
35 °C vs 41 °C	1	1097.225319	10173.5931	0.97545446	0.001	0.006
37 °C vs 39 °C	1	183.7934158	3729.81821	0.93577228	0.001	0.006
37 °C vs 41 °C	1	434.6208909	7823.41354	0.96831453	0.001	0.006
39 °C vs 41 °C	1	71.50753824	1196.24228	0.82372087	0.001	0.006

La mayoría de las variables morfométricas evaluadas en este estudio mostraron diferencias estadísticamente significativas (valores de significancia inferiores a 0.05) entre los distintos tratamientos térmicos, lo que indica que las condiciones térmicas influyen de manera diferenciada en estas variables. Sin embargo, las variables ancho de la cabeza (AC), longitud del abdomen (LAB), longitud tibial (LTI), longitud tarsal (LTA) y anchura tarsal (ATA) presentaron valores de significancia superiores a 0.05 al comparar los tratamientos térmicos de 39°C y 41°C. Dichas variables obtuvieron valores de significancia de AC=0.090, LAB=0.100, LTI=0.400, LTA=0.100 y ATA=0.060. Esto sugiere que, para estas variables específicas, no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre estos dos tratamientos térmicos.

En cuanto a los estadísticos descriptivos de las variables morfométricas (Cuadro 4) podemos observar una disminución gradual en cuanto al promedio de las variables respecto a los tratamientos térmicos, donde en el tratamiento de 35°C presenta un promedio mayor en las medidas morfométricas, disminuyendo gradualmente en el tratamiento de 37°C, 39°C y 41°C respectivamente.

Cuadro 4. Se muestran los estadísticos descriptivos de las variables en estudio para cada uno de los tratamientos térmicos

Tratamientos	Descriptivos	Variables										
		AC	LC	LT	LTO	LAB	LAA	LAP	LF	LTi	LTA	ATA
35°C	Promedio	4.47	4.44	13.96	4.95	7.39	10.21	7.19	3.17	3.33	2.69	1.69
	Desv. Estand	0.07	0.07	0.17	0.09	0.25	0.11	0.10	0.05	0.01	0.12	0.05
	Mínimo	4.35	4.32	13.66	4.79	7.03	10.03	7.02	3.09	3.31	2.50	1.57
	Máximo	4.57	4.55	14.23	5.10	7.86	10.38	7.37	3.26	3.35	2.89	1.78
37°C	Promedio	4.18	4.17	13.30	4.68	6.76	9.93	6.92	2.90	3.22	2.40	1.44
	Desv. Estand	0.07	0.06	0.13	0.06	0.09	0.05	0.04	0.04	0.02	0.05	0.02
	Mínimo	4.06	4.06	13.09	4.60	6.62	9.85	6.86	2.83	3.18	2.32	1.40
	Máximo	4.29	4.27	13.52	4.79	6.93	10.03	6.99	2.98	3.26	2.49	1.49
39°C	Promedio	3.78	3.75	12.49	4.35	6.10	9.73	6.65	2.62	3.08	2.18	1.29
	Desv. Estand	0.07	0.08	0.06	0.11	0.07	0.04	0.09	0.07	0.02	0.05	0.06
	Mínimo	3.66	3.63	12.38	4.18	5.97	9.65	6.49	2.49	3.04	2.09	1.18
	Máximo	3.92	3.91	12.60	4.55	6.23	9.80	6.80	2.73	3.12	2.28	1.39
41°C	Promedio	3.72	3.69	12.29	4.25	6.05	9.60	6.52	2.52	3.06	2.14	1.24
	Desv. Estand	0.08	0.08	0.12	0.08	0.08	0.06	0.08	0.07	0.04	0.07	0.05
	Mínimo	3.57	3.57	12.06	4.11	5.91	9.49	6.38	2.39	3.00	2.04	1.15
	Máximo	3.87	3.82	12.48	4.39	6.20	9.70	6.68	2.65	3.12	2.25	1.34

3.6 DISCUSIÓN

La exposición de las larvas de *A. mellifera* a temperaturas elevadas durante el proceso de desarrollo mostró un efecto negativo en la totalidad de las estructuras anatómicas consideradas en este estudio. Sin embargo, los resultados sugieren que esta sensibilidad de las estructuras al aumento de la temperatura no se presenta de manera homogénea. Por ejemplo, LT y LAB presentaron una mayor sensibilidad a la exposición de temperaturas superiores a los 35 °C, ya que entre el rango de los 35 °C a los 41 °C las estructuras LT y LAB redujeron en promedio 1.67 mm y 1.34 mm, respectivamente; Las estructuras AC, LC y LTO redujeron en promedio 0.75 mm, 0.75 mm y 0.70 mm, respectivamente. Mientras que LAA,

LAP, LF, LTI, LTA y ATA disminuyeron en promedio 0.61 mm, 0.67 mm, 0.65 mm, 0.27 mm, 0.55 mm y 0.45 mm, respectivamente.

En relación a esto, Moradinour *et al.* (2023) comentan que la temperatura podría afectar el tamaño de las células y la división celular durante el desarrollo, lo que lleva a una variación en el tamaño de los órganos. Al respecto, Azevedo *et al.* (2002) encontraron que, en *Drosophila melanogaster*, las variaciones de temperatura durante el desarrollo influyeron en el tamaño de diversas estructuras anatómicas al afectar principalmente el tamaño de las células epidérmicas, pero no el número células. En este sentido, para nuestro caso de estudio, surge la pregunta de si la temperatura superior a los 35 °C, durante el proceso de desarrollo de *A. mellifera*, esté promoviendo un aumento en el tamaño de las células o bien una disminución en el número de estas células, esta información nos permitiría entender los mecanismos subyacentes a las variaciones morfométricas identificadas en este estudio.

Por otra parte, con relación a la capacidad de dispersión, se ha reportado que los insectos ectotérmicos de menor tamaño tienen menos almacenamiento de energía para buscar alimento en distancias más largas (Greenleaf *et al.*, 2007). Al respecto, Gyulavári *et al.* (2014) señalan que, en insectos, las dimensiones del tórax son un indicador importante del tamaño corporal, en específico, el ancho del tórax es un indicador de la masa muscular torácica necesaria para el vuelo. Esto coincide con lo reportado por Kehl *et al.* (2015) quienes mencionan que en *Bicyclus anynana* Butler los individuos que presentan un tórax más pesado muestran un mejor rendimiento de vuelo. Bajo este enfoque y considerando que para nuestro caso de estudio la variable LTO mostró una disminución de 0.27 mm, 0.33 mm y 0.1 mm en los tratamientos térmicos de 37 °C, 39 °C y 41 °C, respectivamente, es probable que las abejas de *A. mellifera* que sean expuestas a temperaturas superiores a los 35 °C durante su fase larvaria presenten una menor resistencia de vuelo.

Asimismo, se ha reportado que la exposición a altas temperaturas en etapas tempranas y de pupa del desarrollo comúnmente resulta en alas pequeñas (Gérard et al., 2018; Soule et al., 2020), esto coincide con los resultados obtenidos en el presente estudio ya que LAA y LAP disminuyeron 0.61mm y 0.67 mm entre el rango de 35 °C a 41 °C, respectivamente, esta condición también pudiera ser un factor que comprometa el rendimiento del vuelo en *A. mellifera*. Sin embargo, sorprendentemente, los estudios sobre el efecto de la temperatura de desarrollo en la deformidad las a alas en insectos son limitados, a pesar del impacto que estos factores pueden tener en el rendimiento y la dinámica del vuelo (Moradinour et al., 2023).

3.7 CONCLUSIÓN

A manera de conclusión, considerando que todas las estructuras anatómicas fueron afectadas de manera negativa al someter las larvas de *A. mellifera* a temperaturas superiores a los 35 °C. Sin embargo, la sensibilidad a las altas temperaturas varía entre las estructuras anatómicas consideradas en este estudio, siendo LT y LAB quienes mostraron una mayor sensibilidad. Asimismo, se identificó que estructuras que son clave para un mejor rendimiento de vuelo se ven afectadas al someter las larvas de *A. mellifera* a temperaturas superiores a los 35 °C. Por lo que es probable que ante el calentamiento global esta especie pueda presentar una menor resistencia de vuelo, comprometiendo su capacidad de dispersión, así como la maniobrabilidad y la capacidad de despegue, los cuales son factores para evitar a los depredadores.

3.8 LITERATURA CITADA

- Anderson, M. J. (2014). Permutational multivariate analysis of variance (PERMANOVA). Wiley statsref: statistics reference online, 1-15.
- Arca, O. C. R. V., Arca, B. S. M., & Silva, R. E. A. (2016). Características morfo métricas, comportamiento higiénico y agresividad de abejas criollas *Apis mellifera* sp. UCV Hacer, 5(1), 16-23.

- Armstrong, R. A. (2014). When to use the Bonferroni correction. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 34(5), 502-508.
- Azevedo, R. B. R., French, V., & Partridge, L. (2002). Temperature modulates epidermal cell size in *Drosophila melanogaster*. *Journal of insect physiology*, 48(2), 231-237.
- Barragán Barrera, H. N. (2020). Efectos de la elevación sobre la alometría sensorial en la abeja de la miel, *Apis mellifera* (Doctoral dissertation, Universidad del Rosario).
- Chuda-Mickiewicz, B., & Samborski, J. (2015). The quality of honey bee queens from queen cells incubated at different temperatures. *Acta Scientiarum Polonorum. Zootechnica*, 14(4).
- Garibaldi, L. A., Steffan-Dewenter, I., Winfree, R., Aizen, M. A., Bommarco, R., Cunningham, S. A. et al. (2013). Wild pollinators enhance fruit set of crops regardless of honeybee abundance. *Science*, 339, 1608-1611. <https://doi.org/10.1126/science.1230200>.
- Gerard, M., Michez, D., Debat, V., Fullgrabe, L., Meeus, I., Piot, N., ... & Vanderplanck, M. (2018). Stressful conditions reveal decrease in size, modification of shape but relatively stable asymmetry in bumblebee wings. *Scientific Reports*, 8(1), 15169.
- Gómez, B., & Jones, R. W. (2002). Manual de métodos de colecta, preservación y conservación de insectos. Chiapas: El Colegio de la Frontera Sur.
- Greenleaf, S. S., Williams, N. M., Winfree, R., & Kremen, C. (2007). Bee foraging ranges and their relationship to body size. *Oecologia*, 153, 589-596.
- Li, X., Ma, W., Shen, J., Long, D., Feng, Y., Su, W., ... & Jiang, Y. (2019). Tolerance and response of two honeybee species *Apis cerana* and *Apis mellifera* to high temperature and relative humidity. *PloS One*, 14(6), e0217921.
- Kehl, T., Bensch, J., Böhm, F., Kniepkamp, B. O., Leonhardt, V., Schwieger, S., & Fischer, K. (2015). Fat and sassy: factors underlying male mating success in a butterfly. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 155(3), 257-265.
- Maechler, M., Rousseeuw, P., Struyf, A., Hubert, M., Hornik, K., Studer, M., ... & Schubert, E. (2013). Package 'cluster'. *Dosegljivo na*, 980.

- Martinez Arbizu, P. (2020). pairwiseAdonis: Pairwise multilevel comparison using adonis. R package 48e espe 0.4, 1.
- Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pörtner, H. O., Roberts, D., Skea, J., & Shukla, P. R. (2022). Global Warming of 1.5 C: IPCC special report on impacts of global warming of 1.5 C above pre-industrial levels in context of strengthening response to climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Cambridge University Press.
- McDonald, J. M., Ghosh, S. M., Gascoigne, S. J., & Shingleton, A. W. (2018). Plasticity through canalization: the contrasting effect of 48e especies on trait size and growth in *Drosophila*. *Frontiers in Cell and Developmental Biology*, 6, 156.
- Moradinour, Z., Wiklund, C., Miettinen, A., Gérard, M., & Baird, E. (2023). Exposure to elevated 48e especies during development affects eclosion and morphology in the temperate *Pieris napi* butterfly (Lepidoptera: Pieridae). *Journal of Thermal Biology*, 118, 103721.
- Orjuela-Parrado, R.L. (2018). Variación morfométrica de abejas africanizadas en un gradiente altitudinal de la Cordillera Oriental (Colombia). *Revista de Biología Tropical*, 55(3-4):931-941.
- Pierre, J. P., Díaz, C. D. J., & Le Conte, Y. (2007). Apicultura: Conocimiento de la abeja. Manejo de la Colmena, 4ta Ed. Editorial Mundi-Prensa.
- Potts, S. G., Imperatriz-Fonseca, V., Ngo, H. T., Aizen, M. A., Biesmeijer, J. C. y Breeze, T. D. (2016). Safeguarding pollinators and their values to human well-being. *Nature*, 540, 220-229.
- R Core Team. 2021. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <http://www.R-project.org/> (accessed April 12, 2024).
- Ruttner, F., Tassencourt, L., & Louveaux, J. (1978). Biometrical-statistical analysis of the geographic variability of *Apis mellifera* LI Material and methods. *Apidologie*, 9(4), 363-381.
- Simone-Finstrom, M., Li-Byarlay, H., Huang, M. H., Strand, M. K., Rueppell, O., & Tarpy, D. R. (2016). Migratory management and environmental conditions

- affect lifespan and oxidative stress in honey bees. *Scientific reports*, 6(1), 32023.
- Soroye, P., Newbold, T., & Kerr, J. (2020). Climate change contributes to widespread declines among bumble bees across continents. *Science*, 367(6478), 685-688.
- Soule, A. J., Decker, L. E., & Hunter, M. D. (2020). Effects of diet and 49e especies on monarch butterfly wing morphology and flight ability. *Journal of Insect Conservation*, 24(6), 961-975.
- Souza, D. L., Evangelista-Rodrigues, A., Ribeiro, M. N., Padilla Álvarez, F., Farias, E. S. L., & Pereira, W. E. (2009). Análises morfométricas entre *Apis mellifera* da mesorregião do sertão paraibano. *Archivos de zootecnia*, 58(221), 65-71.
- Stabentheiner, A., Kovac, H., & Brodschneider, R. (2010). Honeybee colony thermoregulation—regulatory mechanisms and contribution of individuals in dependence on age, location and thermal stress. *PloS one*, 5(1), e8967.
- Steinskog, D. J., Tjøstheim, D. B., & Kvamstø, N. G. (2007). A cautionary note on the use of the Kolmogorov–Smirnov test for normality. *Monthly Weather Review*, 135(3), 1151-1157.
- Wickham, H., Hester, J., Chang, W., & Hester, M. J. (2022). Package 'devtools'. Retrieved from [https-CRAN.R-project.Orgpackage= devtools](https-CRAN.R-project.Orgpackage=devtools).
- Zar, J. H. (1999). *Biostatistical analysis*. Prentice Hall. 663 pp.
- Zattara, E. E., & Aizen, M. A. (2021). Worldwide occurrence records suggest a global decline in 49e especies richness. *One Earth*, 4(1), 114-123.

CAPITULO 4. Identificación de zonas potenciales para la apicultura en la Comarca Lagunera ante el cambio climático

Identification of potential areas for beekeeping in the Comarca Lagunera in the face of climate change

Juan Tello-Ruiz¹, Armando López-Santos^{1*}, Jorge Luis Becerra-López², Miguel Ángel Mata Espinosa¹, José Villanueva Díaz³

* Corresponding author: Armando López-Santos;

alopez@chapingo.uruza.edu.mx.

1. Programa de Posgrado en Recursos Naturales y Medio Ambiente de Zonas Áridas, Universidad Autónoma Chapingo, Apdo. Postal 8, Bermejillo, Durango, CP 35230, México.
- 2.- Laboratorio de Cambio Climático y Conservación de Recursos Naturales, Centro de Estudios Ecológicos, Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Juárez del Estado de Durango, Gómez Palacio, Durango, México.
- 3.- Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua- Suelo- Planta-Atmósfera del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (CENID RASPA INIFAP). kilómetro 6+500 margen derecha canal Sacramento. 35140 Gómez Palacio, Durango, México.

4.1 RESUMEN

El cambio climático, intensificado por actividades humanas, ha provocado un aumento sostenido de la temperatura global, afectando ecosistemas y fragmentando hábitats. Los ectotermos, como los insectos, son especialmente vulnerables debido a su dependencia térmica. En particular, *Apis mellifera*, clave en la polinización, ha mostrado sensibilidad a estas alteraciones, lo que podría generar consecuencias ecológicas y económicas significativas. En este sentido,

el objetivo de este estudio es identificar zonas potenciales para la apicultura en la Comarca Lagunera ante proyecciones de cambio climático. Para llevar a cabo este objetivo, se empleó el modelo de nicho ecológico a través del programa R empleando 10 algoritmos de modelado para evaluar la idoneidad de hábitat bajo condiciones del clima actual y futuro. Los resultados mostraron un buen ajuste con un AUC superior a 0.90, indicando un modelo con buena confiabilidad a partir de los registros geográficos y de tolerancias térmicas registrados. Se obtuvo el modelo de idoneidad de hábitat para la especie *A. mellifera* considerando las condiciones climáticas actuales y para el periodo 2021-2040, bajo el criterio de la "CMIP6", considerando la Trayectoria Socioeconómica Compartida 5-8.5 W/m² (SSP5-8.5); por lo tanto, se identificaron zonas adecuadas para el establecimiento de colmenas de *A. mellifera* en la región Lagunera.

Palabras clave: Abeja, ectotermos, polinización, idoneidad de hábitat, modelado de nicho.

4.2 ABSTRACT

Climate change, intensified by human activities, has caused a sustained increase in global temperature, affecting ecosystems and fragmenting habitats. Ectotherms, such as insects, are especially vulnerable due to their thermal dependence. In particular, *Apis mellifera*, a key pollinator, has shown sensitivity to these alterations, which could generate significant ecological and economic consequences. In this regard, the objective of this study is to identify potential areas for beekeeping in the Comarca Lagunera in the face of climate change projections. To achieve this objective, the ecological niche model was used through the R program, employing 10 modeling algorithms to evaluate habitat suitability under current and future climate conditions. The results showed a good fit with an AUC greater than 0.90, indicating a model with good reliability based on geographical records and recorded thermal tolerances. A habitat suitability model for the *A. mellifera* species was derived under current climatic conditions and for the period 2021-2040, using the CMIP6 criteria, considering the Shared Socioeconomic Pathway 5-8.5 W/m² (SSP5-8.5); thus, suitable areas for the establishment of *A. mellifera* hives were identified in the Laguna region.

Keywords: Bee, ectotherms, pollination, habitat suitability, niche modeling.

4.3 INTRODUCCIÓN

El cambio climático representa una de las principales amenazas globales, con impactos negativos en los ámbitos ecológico, económico y social (Ganie et al., 2024). Aunque el clima de la Tierra ha variado a lo largo del tiempo, existe evidencia que las actividades antropogénicas han intensificado estos cambios, generando un incremento sostenido en la temperatura promedio del planeta (Adamo et al., 2021). Estas alteraciones han contribuido a la degradación, fragmentación y pérdida de hábitats naturales, afectando la estabilidad de diversos ecosistemas y sus comunidades biológicas (Muhsin et al., 2023).

Uno de los grupos de organismos más sensibles a estas modificaciones ambientales son los ectotermos, cuya fisiología depende directamente de la temperatura del ambiente (Amarasekare, 2024). Al no contar con mecanismos internos eficientes para regular su temperatura corporal, su supervivencia y rendimiento biológico están estrechamente ligados a las condiciones climáticas externas (Gardner et al., 2024). Por lo tanto, ante un entorno cambiante, estos organismos pueden verse forzados a modificar sus rangos de distribución o enfrentar reducciones poblacionales si no encuentran hábitats adecuados (Eickermann et al., 2023).

En este contexto, los insectos se ven particularmente afectados por el cambio climático. Según Soroye et al. (2020), se ha observado una disminución significativa en la presencia de polinizadores en América del Norte y Europa, atribuida en parte al aumento de temperaturas extremas y a la pérdida de hábitat. A su vez, especies como *Apis mellifera*, que tienen un rol clave en la polinización de cultivos y plantas silvestres, han mostrado vulnerabilidad ante condiciones climáticas adversas, lo cual podría tener implicaciones tanto ecológicas como económicas (Roy et al., 2018; Gardner et al., 2024).

En regiones como la Comarca Lagunera, los efectos del cambio climático se manifiestan en forma de sequías prolongadas, aumento de temperatura y

deterioro de la calidad ambiental (Inzunza-López et al., 2007), lo que representa una amenaza directa para los polinizadores. Considerando este contexto y a falta de información, los modelos de nicho ecológico (MNE) se presenta como una herramienta útil para evaluar la disponibilidad de hábitat de *Apis mellifera* y su vulnerabilidad bajo diferentes escenarios de cambio climático. Los MNE se pueden evaluar desde dos perspectivas, el enfoque correlativo que considera datos ambientales y espaciales (datos de ocurrencia geográfica) (Sillerio & Barbosa, 2021), y el mecanicista, que considera datos fisiológicos, morfológicos o conductuales (Kearney & Porter, 2009).

Por lo tanto, el presente estudio tiene la finalidad de identificar zonas potenciales para la apicultura en la Comarca Lagunera mediante el modelado de nicho ecológico ante proyecciones de cambio climático. Analizar estas interacciones resulta fundamental para comprender los retos actuales en conservación biológica y para proponer estrategias que mitiguen los impactos del cambio climático en la actividad apícola, como la reubicación planificada de apiarios hacia zonas con condiciones climáticas más estables y adecuadas para la supervivencia y productividad de las abejas.

4.4 MATERIALES Y MÉTODOS

3.4.1 Ubicación geográfica del área de estudio

El área de estudio comprendió 14 municipios que forman parte de la Comarca Lagunera con una superficie total de 40,879.89 km²; se encuentra ubicada en la parte centro norte de la República Mexicana, entre los meridianos 102° 22' y 104° 47' longitud oeste, y los paralelos 24° 22' y 26° 23' latitud norte (Orona et al., 2006). El proyecto se desarrolló en colaboración con apicultores rurales de la comarca lagunera de Coahuila y Durango (México), esto con la finalidad de obtener información de la ubicación e historial de las colmenas silvestres.

3.4.2 Preparación y realización del modelado correlativo y mecanicista

Para la obtención del modelo se establecieron dos procesos, la preparación y la realización del modelo. La preparación constó de la recopilación de los registros geográficos, comprobación de la proyección espacial y selección de variables bioclimáticas para el modelo correlativo; y para el modelo mecanicista, la obtención de las muestras (individuos de *A. mellifera* de las colmenas georreferenciadas), identificación de las TCmax y TCmin de los individuos, y la incorporación de la información a capas ráster para la obtención de una capa bioclimática de tolerancias térmicas Figura 1.

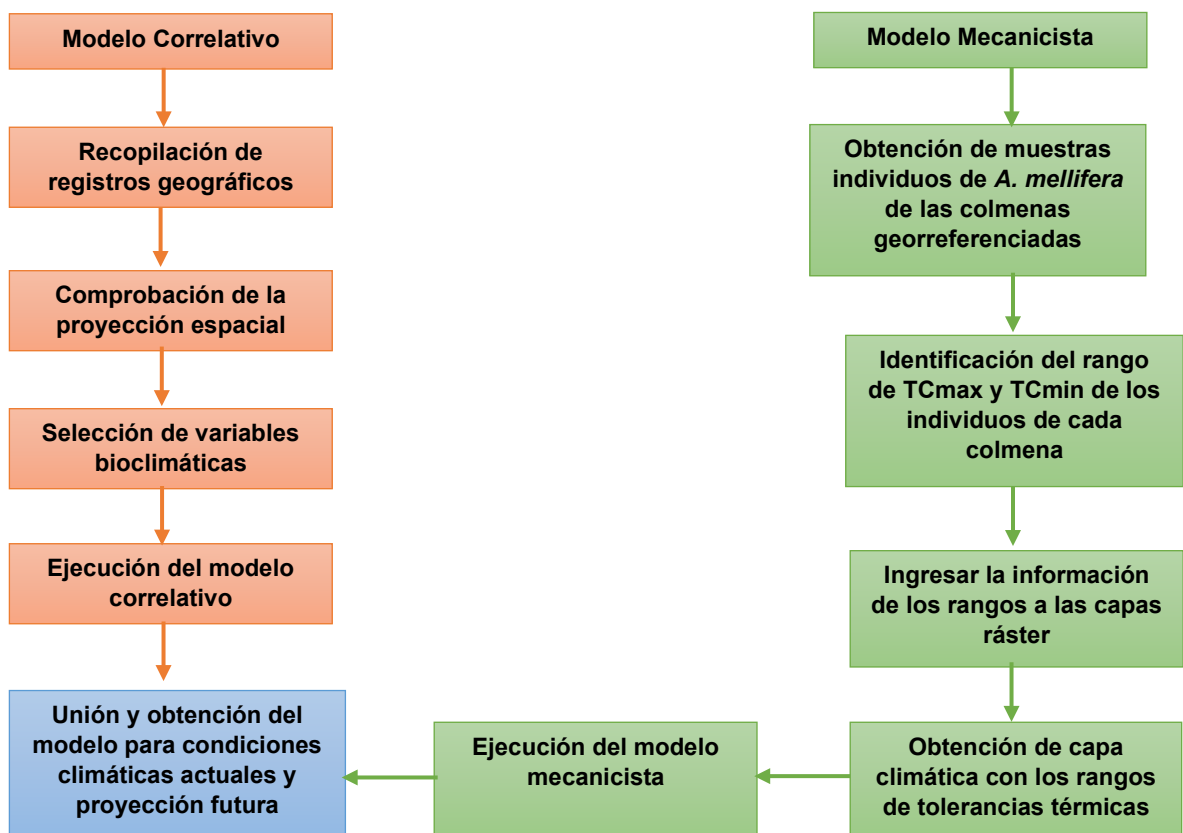


Figura 1. Preparación y realización del modelo

4.4.3 Obtención de muestras y registros geográficos

Posteriormente, para desarrollar el modelo correlativo, con un muestreo totalmente al azar se identificaron 20 registros de colmenas silvestres de *Apis*

mellifera alrededor de los 14 municipios que conformaron el área de estudio en la Comarca Lagunera. Para desarrollar el modelo mecanicista fue necesario tomar 43 individuos de cada una de las colmenas georreferenciadas para obtener sus rangos de tolerancias térmicas (TCmax – Tcmin).

4.4.4 Identificación de TCmax y TCmin

Con el fin de identificar las TCmax y TCmin se realizó considerando un tamaño de muestra a partir del cálculo para poblaciones infinitas (Zar, 1999) representado por la siguiente formula estadística.

$$n = \frac{Z^2 pq}{d^2}$$

Donde n = tamaño de muestra; Z = nivel de confianza, en nuestro caso de estudio tomaremos un porcentaje del 95% representado con el valor de 1.96; p = proporción aproximada (50% = 0.5); q = 1-p (1-0.5 = 0.5); d = precisión (se trabajará con un error del 15% = 0.15), tomando en cuenta esta fórmula estadística, el tamaño de muestra establecido será de 43 abejas por cada colmena silvestre georreferenciada.

Las abejas muestreadas fueron sometidas a una fuente de temperatura externa con la finalidad de identificar la temperatura critica máxima (TCmax) y temperatura critica mínima (TCmin) soportables por los individuos de cada una de las colmenas identificadas, las tolerancias térmicas se obtuvieron con la cámara climática Vevor 1.0.

4.4.4.1 Preparación de datos para el modelo correlativo

Los 20 registros resultantes del muestreo se sometieron a un análisis en el software estadístico R (versión 4.2.0, R Core Team, 2021) utilizando la librería “dismo” (Hijmans et al., 2017), con la cual, se comprobó la proyección geográfica

de cada registro con la finalidad de eliminar todo aquel que resultase duplicado y así mismo, evaluar el sesgo de muestro (Hijmans & Spooner, 2001).

4.4.5 Preparación de datos para el modelo mecanicista

Los valores de tolerancias térmicas obtenidos de las 20 colmenas muestreadas se añadieron a la tabla de atributos mediante el método de unión de mosaicos (Romero-Méndez, 2015) para la creación de capas ráster con información climática de la especie para obtener capas bioclimáticas de las tolerancias térmicas de la especie, esto se realizó en el software ArcMap 10.5.

4.4.6 Zonificación

Mediante el uso de los 20 datos de ocurrencia de colmenas silvestres y la capa de Uso de Suelo y Vegetación Serie VII (INEGI, 2021) en el software ArcMap 10.5, en el área de distribución se identificaron seis tipos de vegetación en las que se ha encontrado la presencia de colmenas silvestres de *A. mellifera*, las cuales fueron: Matorral Desértico Micrófilo, Matorral Desértico Rosetófilo, Vegetación Halófila Xerófila, Vegetación Secundaria Arbustiva de Matorral Desértico Micrófilo, Vegetación Secundaria Arbustiva de Pastizal Natural, Vegetación Secundaria Arbustiva de Vegetación Halófila Xerófila.

4.4.7 Selección de Variables Bioclimáticas

Las variables bioclimáticas utilizadas se obtuvieron de la base de datos WorldClim v2.1 a una resolución espacial de 0.5 min (1 km²) por pixel, que incluye 19 variables con información climática provenientes de valores mensuales de temperatura y precipitación, tomados en un periodo de tiempo entre los años 1970 y 2000. Figura 2 (Fick & Hijmans, 2017).

BIO2 = Rango medio diurno (Media mensual (temperatura máxima - temperatura mínima))
BIO3 = Isotermalidad (BIO2/BIO7) (×100)
BIO4 = Estacionalidad de la temperatura (desviación estándar ×100)
BIO5 = Temperatura máxima del mes más cálido
BIO6 = Temperatura mínima del mes más frío
BIO7 = Rango anual de temperatura (BIO5-BIO6)
BIO8 = Temperatura media del trimestre más húmedo
BIO9 = Temperatura media del trimestre más seco
BIO10 = Temperatura media del trimestre más cálido
BIO11 = Temperatura media del trimestre más frío
BIO12 = Precipitación anual
BIO13 = Precipitación del mes más lluvioso
BIO14 = Precipitación del mes más seco
BIO15 = Estacionalidad de la precipitación (coeficiente de variación)
BIO16 = Precipitación del trimestre más húmedo
BIO17 = Precipitación del trimestre más seco
BIO18 = Precipitación del trimestre más cálido
BIO19 = Precipitación del trimestre más frío

Cuadro 1. 19 variables bioclimáticas - WorldClim

Se ha registrado que algunas variables pueden presentar una alta correlación entre sí, por lo que, para obtener un mejor ajuste en los datos, se buscó obtener la menor cantidad de variables reduciendo la correlación entre ellas (Elith et al., 2011; Cruz-Cárdenas et al., 2013), para obtener esta reducción, se implementó el análisis de correlación bivariada (Merow et al., 2013) y se tomó en cuenta la ecología de la especie (Loarie et al., 2009).

En relación a lo anterior, para evitar el error de colinealidad, en el software estadístico R (versión 4.2.0, R Core Team, 2021) siguiendo la librería “dismo”, se agregaron aleatoriamente 10,000 puntos de fondo al polígono del área de distribución de *A. mellifera*, que posteriormente se les proporcionó información

de las 19 capas climáticas, esto con el objetivo de no segregar áreas geográficas con información climática importante dentro del rango geográfico de la especie (Becerra-López et al., 2016).

A continuación, con la información resultante se llevó a cabo el análisis de correlación bivariada en el software estadístico R (versión 4.2.0, R Core Team, 2021), mostrando el nivel de correlación entre las variables que, posteriormente, fueron excluidas aquellas que presentaron una alta correlación ($|r| \geq 0.75$) (Becerra-López et al., 2017). Finalmente se obtuvieron las siguientes seis variables climáticas: Estacionalidad de la temperatura (Bio 4), Rango anual de temperatura (Bio5-Bio6) (Bio 7), Temperatura media del trimestre más húmedo (Bio 8), Temperatura media del trimestre más cálido (Bio 10), Precipitación del mes más seco (Bio 14), y precipitación del trimestre más frío (Bio 19).

4.4.8 Modelo de nicho correlativo y mecanicista

Para llevar a cabo la identificación de zonas potenciales para la apicultura en la Comarca Lagunera, se implementó el modelo de nicho bajo el enfoque correlativo, este enfoque considera correlaciones significativas entre la distribución geográfica de la especie y las variables ambientales de la zona (Guisan & Zimmermann, 2000). Empleando el software estadístico R (versión 4.2.0, R Core Team, 2021) y la librería “sdm” (Naimi & Araújo, 2016) se modeló las zonas potenciales para la apicultura, utilizando las variables climáticas previamente seleccionadas y 10 algoritmos de modelado, siendo utilizados: Generalized Additive Model (GAM), Boosted Regression Tree (BRT), Random Forest (RF), Support Vector Machine (SVM), Bioclimate Envelope Model (BIOCLIM), BIOCLIMDISMO, Classification and regression trees (CART), Multivariate Adaptive Regression Spline (MARS), Maximum Entropy (MAXENT), Recursive Partitioning and Regression Trees (RPART). Posteriormente se realizó un consenso implementando la multiplicación de los modelos, obteniendo un modelo correlativo único bajo condiciones del clima actual.

Por otra parte, para desarrollar el método mecanicista fue necesario la obtención de la temperatura crítica máxima (TCmax) y temperatura crítica mínima (TCmin) de los 43 individuos muestreados de las 20 colmenas identificadas en la Comarca Lagunera. A continuación, a través del programa R-project (versión 4.2.0, R Core Team, 2021), a cada registro geográfico de las colmenas, se le proporcionó información sobre las tolerancias térmicas registradas utilizando las capas climáticas de temperatura obtenidas de la base de datos ambientales WorldClim 2.1.

Con esta información, utilizando el programa R-project (versión 4.2.0, R Core Team, 2021) y a través de la librería “dismo” (Hijmans et al., 2017) se llevó a cabo el análisis de superposición aditiva de capas, con la finalidad de identificar zonas térmicas idóneas para la presencia de *A. mellifera*, basado en las tolerancias fisiológica de la especie. Finalmente, a partir del modelo mecanicista y correlativo se realizó un consenso identificando zonas potencialmente aptas para la apicultura bajo condiciones del clima actual con la categorización de las zonas, identificando idoneidad alta, media alta, media, media baja y baja.

4.4.9 Modelo de nicho correlativo y mecanicista para el año 2021-2040

A continuación, utilizando los algoritmos de modelado ya mencionados para el enfoque correlativo, se evaluó la idoneidad climática de *A. mellifera* considerando el siguiente Modelo de Circulación General (GCM): CanESM5, bajo una resolución espacial de 2.5 min (5 km²) propuestos para el periodo 2021-2040.

Estas son proyecciones climáticas futuras de la CMIP6, en este estudio se consideró la Trayectoria Socioeconómica Compartida 5-8.5 W/m² (SSP5-8.5). Considerando que los combustibles fósiles satisfacen la demanda energética actual, y estimando que se utilizará por lo menos el 80% de estos para la demanda energética requerida en 2040 (Beltrán-Telles et al., 2017), se decidió

utilizar SSP5 8.5 W/m² para modelar la idoneidad de ambientes climáticos adecuados y potencialmente óptimos para la apicultura. Asimismo, consideramos que SSP5 8.5 W/m² es el escenario climático que ofrece la mejor prueba de la hipótesis establecida ya que presenta una mayor diferenciación entre las condiciones ambientales actuales y futuras. Esta información climática fue obtenida de la página de WorldClim 2.1.

Posteriormente, obteniendo el modelo climático para cada algoritmo bajo el GCM, en el software estadístico R-project (versión 4.2.0, R Core Team, 2021), se realizó una estandarización a la escala de predicción de idoneidad climática para posteriormente realizar un consenso, obteniendo como resultado un modelo para cada algoritmo de modelado. Finalmente, se llevó a cabo el consenso de los modelos de cada algoritmo y se obtuvo un único modelo de idoneidad climática para el periodo 2021-2040 bajo el enfoque correlativo.

Por otro lado, para el enfoque mecanicista, utilizando la información sobre las colmenas georreferenciadas y las tolerancias térmicas registradas, se evaluó la idoneidad de hábitat de *A. mellifera* considerando el análisis de superposición aditiva de capas y el Modelo de Circulación General (GCM) ya seleccionado propuesto para el periodo 2021-2040, que resultó en un modelo bajo el enfoque mecanicista.

Por último, a partir del modelo mecanicista y correlativo se llevó a cabo un consenso que nos permitió identificar el efecto del cambio climático en las zonas potencialmente aptas para la apicultura en la Comarca Lagunera para el periodo 2021-2040.

4.5 RESULTADOS

El análisis de correlación bivariada (figura 2) nos muestra las variables bioclimáticas que están altamente correlacionadas entre sí. Por lo tanto, se seleccionaron aquellas que presentaban la mayor cantidad de correlaciones,

dando como resultado Estacionalidad de la temperatura (Bio 4), Rango anual de temperatura (Bio5-Bio6) (Bio 7), Temperatura media del trimestre más húmedo (Bio 8), Temperatura media del trimestre más cálido (Bio 10), Precipitación del mes más seco (Bio 14), y precipitación del trimestre más frío (Bio 19).

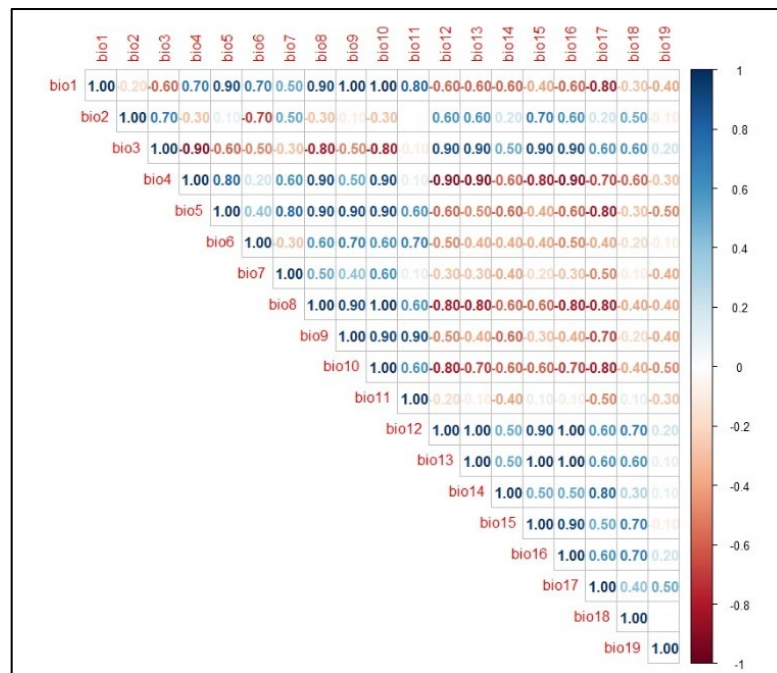


Figura 2. Análisis de correlación bivariada de las variables bioclimáticas

En cuanto el modelo de idoneidad climática de *A. mellifera* para el clima actual (figura 3) indica una alta idoneidad en el área central de la comarca lagunera, incluyendo los municipios de Cuencamé, General Simón Bolívar, Gómez Palacio, Lerdo, Mapimí, Matamoros, Nazas, Rodeo, San Luis del Cordero, San Pedro y Torreón. Sin embargo, presenta una baja idoneidad en la zona norte y sur de la Comarca Lagunera. El modelo presentó un buen ajuste con un AUC superior a 9.0 (figura 4) indicando una buena confiabilidad.

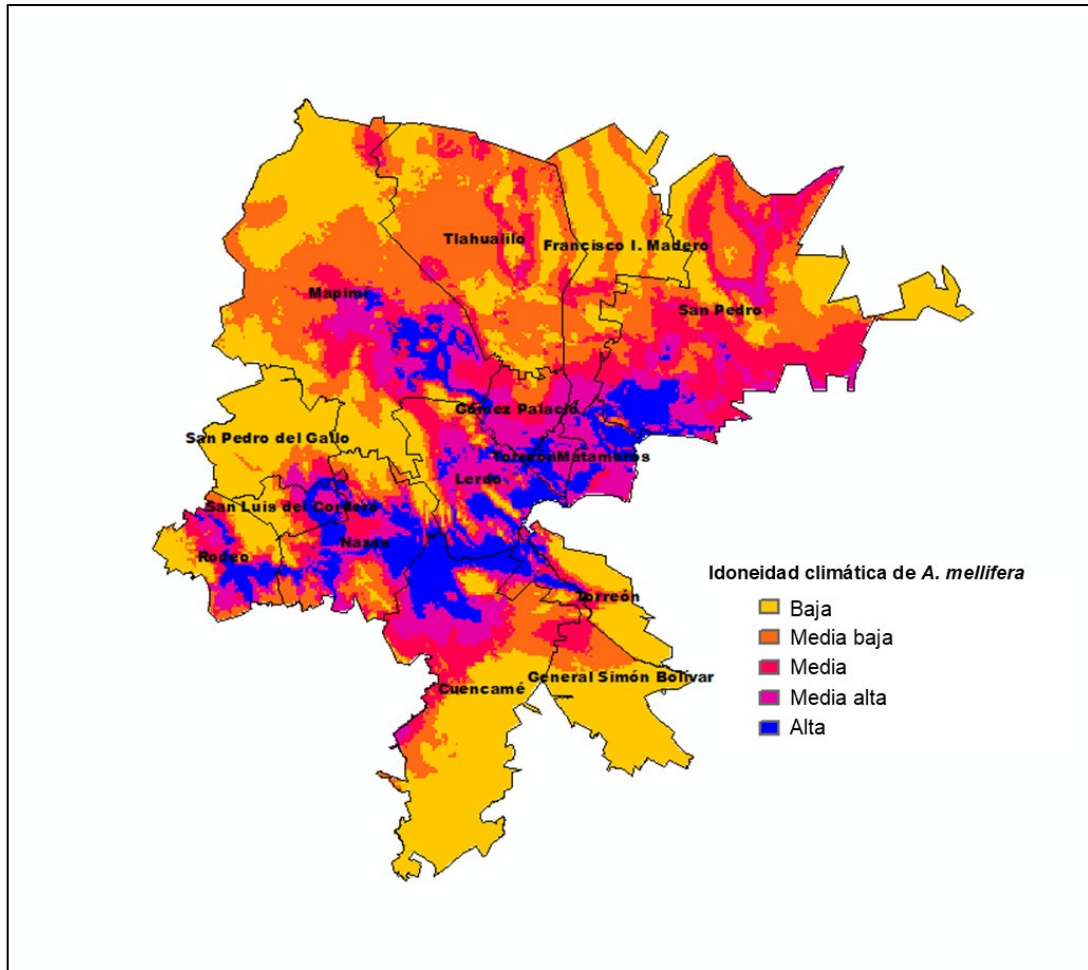


Figura 3. Modelo de Idoneidad de Hábitat de *A. mellifera* para el clima actual

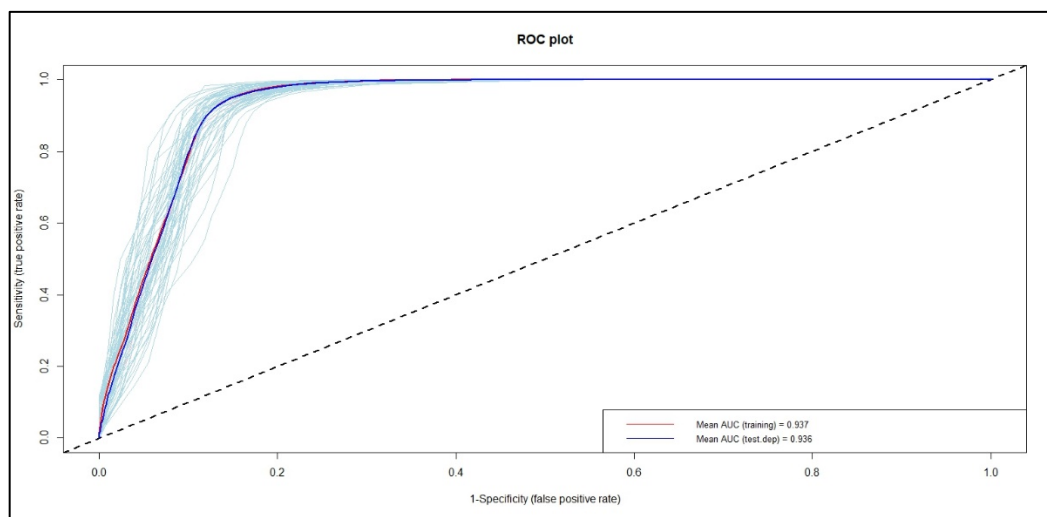


Figura 4. Curva de ROC para el modelo de idoneidad de Hábitat para el clima actual con valor un valor de AUC de 9.3

En cuanto al modelo de idoneidad climática de *A. mellifera* para el clima futuro (figura 5) indica una alta idoneidad en la zona central de la Comarca Lagunera, incluyendo una mayor representación en municipios como: Cuencamé, Gómez Palacio, Lerdo, Matamoros, Nazas, Rodeo y San Pedro. Sin embargo, el modelo para el periodo 2021-2040 presenta una disminución en las áreas de idoneidad en la Comarca Lagunera. Al igual que el modelo anterior presentó un ajuste AUC superior a 9.0 (figura 6) indicando una buena confiabilidad del modelo.

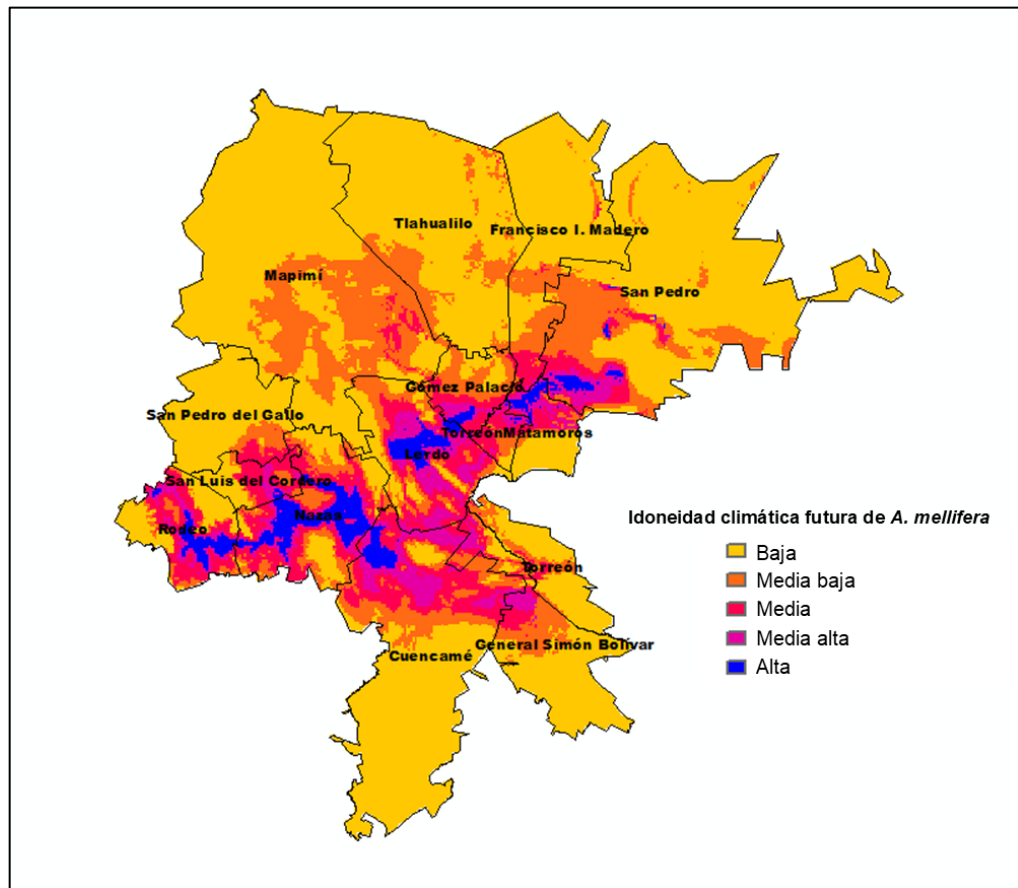


Figura 5. Modelo de Idoneidad de Hábitat de *A. mellifera* para el clima futuro

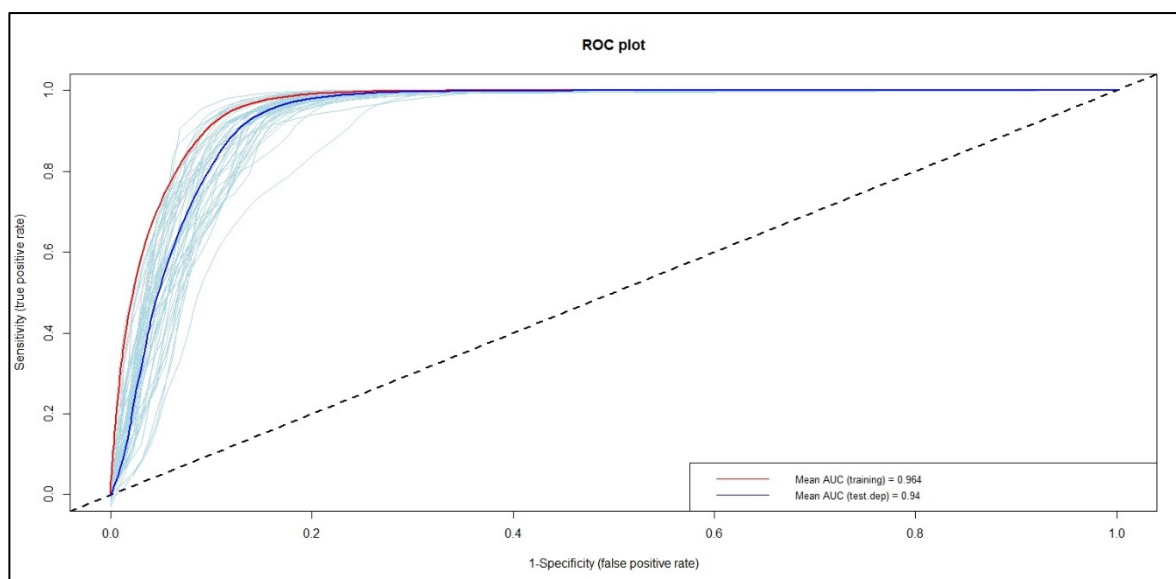


Figura 6. Curva de ROC para el modelo de idoneidad de Hábitat para el clima futuro con valor un valor de AUC de 9.4

4.6 DISCUSIÓN

Las áreas de idoneidad climática que se presentaron en este trabajo tuvieron valores de AUC-ROC entre regulares a buenos (0.7 a 1), según lo reportado por Peterson y Soberón, 2008. Por lo que podemos concluir una confiabilidad alta de los modelos presentando un AUC de 9.3 para el clima actual y de 9.4 para el clima futuro respectivamente. Para la proyección de 2021-2040 se presenta una pérdida de idoneidad de hábitat en los modelos obtenidos. Sin embargo, se mantienen algunas zonas con alta idoneidad climática, principalmente en los municipios de Lerdo, Nazas y Rodeo.

A pesar de los resultados obtenidos cabe la propuesta de evaluar idoneidad climática de las especies vegetales silvestres con importancia apícola en la región, ya que, Rodríguez y colaboradores (2019) reportaron una correlación importante entre la idoneidad de hábitat de *A. mellifera* y las plantas silvestres Astaraceae en la zona de estudio entre Michoacán y Jalisco, el modelado de nicho que obtuvieron, revela que hay una mayor presencia en zonas donde abundan estas especies vegetales. Sin embargo, también existe una baja

presencia de la especie en zonas destinadas para la agricultura, los autores exponen la idea que esto se debe a la utilización de pesticidas que afectan las poblaciones de *A. mellifera* que puedan habitar la región.

Estos resultados exponen la vulnerabilidad de *A. mellifera* desde otra vertiente, contemplando factores antropogénicos, por lo que hacen falta más investigaciones para implementar un mapa de idoneidad más completo y evitar zonas de cultivo que comprometan la salud y vulnerabilidad de la especie.

4.7 CONCLUSIÓN

Nuestros resultados indican que existen áreas de baja, media baja, media, media alta y alta idoneidad para el establecimiento de colmenas de *A. mellifera* en la Comarca Lagunera, siendo más adecuada la zona central de la Comarca. Estas zonas se obtuvieron mediante las condiciones de nicho climático ideales para la especie. Sin embargo, el modelo con proyección a futuro para el periodo 2021 - 2040, presenta una disminución importante en las zonas potenciales para la apicultura en la Comarca Lagunera.

Esto demuestra la vulnerabilidad del nicho de la especie ante proyecciones de cambio climático y se recomienda ampliamente el uso de esta información para que los apicultores locales tomen decisiones respecto a las mejores zonas para la instalación de sus apiarios teniendo un mejor panorama de las condiciones ambientales en la región.

Así mismo, se recomiendan estudios a nivel ecológico sobre los nichos de las especies vegetales de las cuales se beneficia *A. mellifera*, de modo que, se complementará de mejor manera para la toma de decisiones respecto a los sitios ideales de instalación de apiarios en la Comarca Lagunera. De esta manera, se busca proporcionar herramientas científicas que orienten la toma de decisiones en la gestión territorial, fomenten prácticas sustentables y aseguren la permanencia de los servicios ecosistémicos asociados a la polinización,

esenciales para la agricultura y la biodiversidad regional. Además, este estudio pretende contribuir al desarrollo de políticas públicas más eficaces que consideren la variabilidad climática como un factor clave en la planificación del uso del suelo y en el fortalecimiento de la resiliencia de los sistemas productivos apícolas.

4.8 LITERATURA CITADA

- Adamo, N., Al-Ansari, N., & Sissakian, V. (2021). Review of climate change impacts on human environment: past, present and future projections. *Engineering*, 13(11), 605-630.
- Ahmad, R., Khuroo, A. A., Hamid, M., Charles, B., & Rashid, I. (2019). Predicting invasion potential and niche dynamics of *Parthenium hysterophorus* (Congress grass) in India under projected climate change. *Biodiversity and Conservation*, 28, 2319-2344.
- Ali, M. A. M. (2011). Comparative study for evaluating two honey bee races, *Apis mellifera jementica* (indigenous race) and *Apis mellifera carnica* (carniolan race) in brood production, population development and foraging activity under the environmental conditions of the central region of the Kingdom of Saudi Arabia. *Annals of Agricultural Sciences*, 56(2), 127-134. <https://doi.org/10.1016/j.aosas.2011.07.006>.
- Amarasekare, P. (2024). Temperature-dependent dispersal and ectotherm species' distributions in a warming world. *Journal of Animal Ecology*, 93(4), 428-446.
- Anoop, N. R., Babu, S., Nagarajan, R., & Sen, S. (2020). Identifying suitable reintroduction sites for the White-rumped Vulture (*Gyps bengalensis*) in India's Western Ghats using niche models and habitat requirements. *Ecological Engineering*, 158, 106034.
- Baena-Díaz, F., Chévez, E., Ruiz de la Merced, F., & Porter-Bolland, L. (2022). *Apis mellifera* en México: producción de miel, flora melífera y aspectos de

- polinización. Revisión. *Revista mexicana de ciencias pecuarias*, 13(2), 525-548. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v13i2.5960>.
- Becerra-López, J. L., Ramírez-Bautista, A., Romero-Méndez, U., Pavón, N. P., & Sánchez-Rojas, G. (2017). Effect of climate change on halophytic grasslands loss and its impact in the viability of *Gopherus flavomarginatus*. *Nature Conservation*, 21, 39-55. <https://doi.org/10.3897/natureconservation.21.13614>
- Becerra-López, J. L., Romero-Méndez, U., Ramírez-Bautista, A., & Becerra-López, J. S. (2016). Revisión de las técnicas para el modelado de la distribución de las especies. *Revista Científica Biológico Agropecuaria Tuxpan*, 5(7), 1514-1525.
- Cruz-Cárdenas, G., Villaseñor, J. L., López-Mata, L., & Ortiz, E. (2013). Distribución espacial de la riqueza de especies de plantas vasculares en México. *Revista mexicana de biodiversidad*, 84(4), 1189-1199.
- Eickermann, M., Junk, J., & Rapisarda, C. (2023). Climate change and insects. *Insects*, 14(8), 678.
- Elith, J., Phillips, S. J., Hastie, T., Dudík, M., Chee, Y. E., & Yates, C. J. (2011). A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and distributions*, 17(1), 43-57.
- Fick, S. E., & Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International journal of climatology*, 37(12), 4302-4315.
- Ganie, S. A., Nisar, T., Rehman, S. A., John, A., Paray, M. A., Lone, J. A., ... & Khurshid, R. (2024). Impact of climate change on insect pollinators and its implication for food security: A review. *SKUAST Journal of Research*, 26(1), 1-14.
- Guisan, A., & Zimmermann, N. E. (2000). Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological modelling*, 135(2-3), 147-186.
- Hijmans, R. J., & Spooner, D. M. (2001). Geographic distribution of wild potato species. *American journal of Botany*, 88(11), 2101-2112.

- Hijmans, R. J., Phillips, S., Leathwick, J., Elith, J., & Hijmans, M. R. J. (2017). Package 'dismo'. *Circles*, 9(1), 1-68.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2021). Uso del suelo y vegetación, escala 1:250000, serie VII (continuo nacional). México. Disponible en: http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis_root/usv/inegi/usv250s7gw.
- Inzunza-López, J. O., López-Ariza, B., Valdez-Cepeda, R. D., Mendoza, B., Sánchez-Cohen, I., & García-Herrera, G. (2011). La variación de las temperaturas extremas en la 'Comarca Lagunera' y cercanías. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 17(SPE), 41-61.
- Kearney, M. (2006). Habitat, environment and niche: what are we modelling?. *Oikos*, 115(1), 186-191.
- Kearney, M., & Porter, W. (2009). Mechanistic niche modelling: combining physiological and spatial data to predict species' ranges. *Ecology letters*, 12(4), 334-350.
- Loarie S. R., P. B. Duffy, H. Hamilton, G. P. Asner, C. B. Field y D. D. Ackerly (2009) The velocity of climatic change. *Nature* 462:1052-1055.
- Merow, C., Smith, M. J., & Silander Jr, J. A. (2013). A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: what it does, and why inputs and settings matter. *Ecography*, 36(10), 1058-1069.
- Muhsin, E. A., Hussain, B. A., & Hammadi, A. M. (2023). The Climate Change and Biodiversity: A Review on Understanding the Global and Local Impacts of Warming on The Ecosystems: A review. *Al-Kufa University Journal for Biology*, 15(2), 10-18.
- Naimi, B., & Araújo, M. B. (2016). sdm: a reproducible and extensible R platform for species distribution modelling. *Ecography*, 39(4), 368-375.
- Orona Castillo, I., Espinoza Arellano, J. D. J., González Cervantes, G., Murillo Amador, B., García Hernández, J. L., & Santamaría César, J. (2006). Aspectos técnicos y socioeconómicos de la producción de nuez (*Carya*

- illinoensis Koch.) en la Comarca Lagunera, México. *Agricultura técnica en México*, 32(3), 295-301.
- Peterson, A. T., Papeş, M., & Soberón, J. (2015). Mechanistic and correlative models of ecological niches. *European Journal of Ecology*, 1(2), 28-38.
- Powers, R. P., & Jetz, W. (2019). Global habitat loss and extinction risk of terrestrial vertebrates under future land-use-change scenarios. *Nature Climate Change*, 9(4), 323-329.
- R Core Team. 2021. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <http://www.R-project.org/> (accessed April 12, 2024).
- Romero-Méndez, Ulises. (2015). GUÍA PRÁCTICA PARA LA MODELACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN POTENCIAL DE LAS ESPECIES.
- Roy, D., Debnath, P., Mondal, D., & Sarkar, P. (2018). Colony collapse disorder of honey bee: A neoteric ruction in global apiculture. *Current Journal of Applied Science and Technology*, 26(3), 1-12. DOI: 10.9734/CJAST/2018/38218.
- Sagibayevna, T. Z., & Nurlan, I. (2025). THE IMPORTANCE AND ROLE OF BEES IN PLANT POLLINATION. *Web of Agriculture: Journal of Agriculture and Biological Sciences*, 3(3), 39-41.
- Soberón, J., Osorio-Olvera, L., & Peterson, T. (2017). Diferencias conceptuales entre modelación de nichos y modelación de áreas de distribución. *Revista mexicana de biodiversidad*, 88(2), 437-441.
- Soroye, P., Newbold, T., & Kerr, J. (2020). Climate change contributes to widespread declines among bumble bees across continents. *Science*, 367(6478), 685-688.
- Tirfie, A. M., & Getachew, A. (2024). Role of Honeybees to Crop Pollination in Ethiopia: A Review. *Agricultural Reviews*, 45(1).
- Zar, J. H. (1999). Biostatistical analysis. *Prentice Hall*. 663 pp.