



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

**NICHO ECOLÓGICO POTENCIAL DE OCHO
ESPECIES DE *RHAGOLETIS* (DÍPTERA,
TEPHRITIDAE) DE IMPORTANCIA AGRÍCOLA
PARA MÉXICO**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y
DESARROLLO RURAL.**

P R E S E N T A:

I.H. ANDREA LIZETH LUNA SÁMANO

CODIRECTORES DE TESIS:

**DR. VÍCTOR LOPÉZ MARTÍNEZ
M.C. NIDIA BÉLGICA PÉREZ DE LA O**



Morelos, México. Diciembre del 2018

**NICHO ECOLÓGICO POTENCIAL DE OCHO ESPECIES DE *RHAGOLETIS*
(DÍPTERA, TEPHRITIDAE) DE IMPORTANCIA AGRÍCOLA PARA MÉXICO**

Tesis realizada por **Andrea Lizeth Luna Sámano** bajo la dirección del Comité Revisor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y DESARROLLO RURAL

COMITÉ REVISOR

Codirección de tesis:

Codirección de Tesis:

Dr. Víctor López Martínez

M. C. Nidia Bélgica Pérez De la O

REVISORES:

Dr. Porfirio Juárez López

Dr. Dagoberto Guillen Sánchez

Dr. Irán Alía Tejacal

Dr. Valentino Sorani Dalbón

Cuernavaca, Morelos, Diciembre de 2018.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por otorgarme la beca número 780604 con la cual fue posible realizar mis estudios de Maestría.

Al programa de Posgrado en Ciencias Agropecuarias y Desarrollo Rural por las facilidades brindadas durante mis estudios de posgrado.

A mi director de tesis Dr. Víctor López por su orientación académica y los comentarios que contribuyeron a mejorar este trabajo de investigación.

A mi codirectora de tesis M.C. Bélgica Pérez de la O, por la asesoría académica, sus acertadas sugerencias, su tiempo y su paciencia.

A los miembros del comité revisor.

Al Dr. Daniel Frías Lasserre por compartirme parte de su conocimiento, por su hospitalidad y por los buenos consejos para esta investigación.

A las colecciones entomológicas (Colección Nacional de Insectos UNAM, Colección entomológica IEXA INECOL, Junta Local Frutícola CESVMOR, Colección Nacional del Centro de Referencia Fitosanitaria SENASICA, Colección Entomológica del Instituto de Fitosanidad COLPOS, Instituto de Entomología UMCE) por permitirme el acceso a su información biológica.

DEDICATORIAS

A todos aquellos que
continúen investigando sobre
Rhagoletis spp. y nichos ecológicos

A mi mamá por su apoyo infinito,
Por su ejemplo que siempre me inspira a seguir adelante
y su gran amor.

A Adriana por creer en mí,
por permitirme volar a su lado
y por su amor incondicional.

ÍNDICE

CONTENIDO		PÁGINA
No.		
1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Género <i>Rhagoletis</i> spp.	3
1.1.1	Importancia del género	3
1.2	Impacto de especies <i>Rhagoletis</i> en la fruticultura nacional	5
1.3	Teoría del nicho y conceptos asociados	7
1.4	Modelos de nicho ecológico (MNE)	9
1.5	Modelos de distribución de especies (SDM)	9
1.6	Diagrama BAM	10
2.	MATERIALES Y MÉTODOS	14
2.1	Datos de presencia	14
2.2	Base de datos	14
2.3	Área de estudio	15
2.4	Proyección de puntos y determinación del área "M"	16
2.5	Variables bioclimáticas	17
2.6	Correlación y selección de variables bioclimáticas	18
2.7	Modelación de espacio ambiental	20
2.8	Calibración del modelo	21
2.9	Cálculo de valor AICc (<i>Akaike Information Criterion for small sample sizes</i>)	23
2.10	Evaluación de los modelos	24
2.11	Proyección en espacio geográfico	25
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	27
3.1	Evaluación de los modelos	27
3.2	<i>Rhagoletis cerasi</i>	27
3.3	<i>Rhagoletis cingulata</i>	32
3.4	<i>Rhagoletis completa</i>	34
3.5	<i>Rhagoletis conversa</i>	37

3.6	<i>Rhagoletis juglandis</i>	41
3.7	<i>Rhagoletis pomonella</i>	43
3.8	<i>Rhagoletis suavis</i>	48
3.9	<i>Rhagoletis zoqui</i>	48
4.	CONCLUSIONES	52
5.	LITERATURA CITADA	53

ÍNDICE DE CUADROS

		PÁGINA
Cuadro 1	Especies de <i>Rhagoletis</i> y sus plantas hospederas.	4
Cuadro 2	Especies y registros utilizados para la modelación de nicho.	15
Cuadro 3	Variables ambientales bioclimáticas ¹ que se emplearon en la modelación de áreas de distribución para especies del género <i>Rhagoletis</i> .	17
Cuadro 4	Modelos más significativos y los valores estadísticos que presentaron.	26
Cuadro 5	Variables bioclimáticas y su aportación al modelo de <i>R. cerasi</i> .	28
Cuadro 6	Resumen de los valores estadísticos y réplicas de calibración de los modelos Maxent de <i>R. cerasi</i> .	28
Cuadro 7	Variables bioclimáticas y su aportación al modelo de <i>R. cingulata</i> .	32
Cuadro 8	Valores estadísticos y réplicas de calibración de los modelos Maxent de <i>R. cingulata</i> .	32
Cuadro 9	Variables bioclimáticas y su aportación al modelo de <i>R. completa</i> .	35
Cuadro 10	Resumen de los valores estadísticos y réplicas de calibración de los modelos Maxent de <i>R. completa</i> .	35
Cuadro 11	Variables bioclimáticas y su aportación al modelo de <i>R. conversa</i> .	38
Cuadro 12	Resumen de los valores estadísticos y réplicas de calibración de los modelos Maxent de <i>R. conversa</i> .	38
Cuadro 13	Variables bioclimáticas y su aportación al modelo de <i>R. juglandis</i> .	41
Cuadro 14	Valores estadísticos y réplicas de calibración de los modelos Maxent de <i>R. juglandis</i>	41

Cuadro 15	Variables bioclimáticas y su aportación al modelo de <i>R. pomonella</i> .	43
Cuadro 16	Resumen de los valores estadísticos y réplicas de calibración de los modelos Maxent de <i>R. pomonella</i> .	44
Cuadro 17	Variables bioclimáticas y su aportación al modelo de <i>R. suavis</i> .	46
Cuadro 18	Valores estadísticos y réplicas de calibración de los modelos Maxent de <i>R. suavis</i> .	48
Cuadro 19	Variables bioclimáticas y su aportación al modelo de <i>R. zoqui</i> .	49

ÍNDICE DE FIGURAS

		PÁGINA
Figura 1	Diagrama BAM. (Soberón y Peterson, 2005)	11
Figura 2	Tabla de la prueba inicial de Jackknife. Recuadro rojo: cinco variables climáticas que mayor porcentaje de información única aportan al modelo.	19
Figura 3	Análisis de correlación. Resaltados en rojo valores no admisibles de correlación (superiores al valor 0.80 o -0.80). Consultar Cuadro 3 para la definición de cada variable bioclimática.	20
Figura 4	Interfaz principal de Maxent diseñada para la introducción de datos de presencia y variables bioclimáticas.	21
Figura 5	Interfaz Settings del software Maxent, diseñada para la introducción de parámetros en la modelación de nicho de especies de <i>Rhagoletis</i> .	22
Figura 6	Interfaz del Software Rstudio para el calculo de AICc.	24
Figura 7	Provincias biogeográficas, 1= Baja California, 2= California, 3= Sonora, 4= Sierra Madre Occidental, 5= Altiplano Mexicano, 6= Tamaulipeca, 7= Costa Pacífica Mexicana, 8= Eje Volcánico Transmexicano, 9= Sierra Madre Oriental, 10= Veracruzana, 11= Cuenca del Balsas, 12= Sierra Madre del Sur, 13= Chiapas, 14= Yucatan (Morrone, 2014).	26
Figura 8	Nicho ecológico potencial de <i>Rhagoletis cerasi</i> en México. Escala: High= 100% (Presencia), - Presencia media 50%, Low= 0 (Ausencia).	30
Figura 9	Nicho ecológico potencial de <i>Rhagoletis cingulata</i> en México. Escala: High= 100% (Presencia), - Presencia media 50%, Low= 0 (Ausencia).	33

Figura 10	Nicho ecológico potencial de <i>Rhagoletis completa</i> en México. Escala: High= 100% (Presencia), - Presencia media 50%, Low= 0 (Ausencia).	36
Figura 11	Nicho ecológico potencial de <i>Rhagoletis conversa</i> en México. Escala: High= 100% (Presencia), - Presencia media 50%, Low= 0 (Ausencia).	39
Figura 12	Nicho ecológico potencial de <i>Rhagoletis juglandis</i> en México. Escala: High= 100% (Presencia), - Presencia media 50%, Low= 0 (Ausencia).	42
Figura 13	Nicho ecológico potencial de <i>Rhagoletis pomonella</i> en México. Escala: High= 100% (Presencia), - Presencia media 50%, Low= 0 (Ausencia).	45
Figura 14	Nicho ecológico potencial potencial de <i>Rhagoletis suavis</i> en México. Escala: High= 100% (Presencia), - Presencia media 50%, Low= 0 (Ausencia).	47
Figura 15	Nicho ecológico potencial de <i>Rhagoletis zoqui</i> en México. Escala: High= 100% (Presencia), - Presencia media 50%, Low= 0 (Ausencia).	50

RESUMEN

Los tefrítidos, constituyen un grave problema fitosanitario para diversas especies de frutales. Para México el género *Rhagoletis* está representado por 35 especies reunidas en 10 grupos, de los cuales el grupo "*pomonella*", "suavis" "nova" y "cingulata" tiene un gran impacto económico en tejocote, manzana, capulín, nueces y arándanos. Dada la importancia de especies del género *Rhagoletis* (Foote, 1981), se calculó el nicho ecológico y se proyectó la distribución potencial de ocho especies de importancia económica en México, para determinar su distribución y diseñar en dónde se implementarían programas de monitoreo, trampeo, inspección, y/o cuarentena. Se emplearon 850 datos de distribución de *Rhagoletis* en el país y se calculó la disponibilidad ambiental utilizando un modelo de nicho correlativo con el algoritmo Maxent este se desarrolló integrando registros de ocurrencia del género *Rhagoletis* con variables climáticas globales.

La mayor disponibilidad ambiental de *Rhagoletis* en México fue proyectada en áreas de las provincias biogeográficas del Eje Volcánico Transmexicano (centro), Sierra Madre Oriental, al centro-sur del Altiplano Mexicano. Las variables que influyeron en la distribución potencial de la especie: Isothermalidad, temperatura y precipitación. La distribución de estos tefrítidos comprende todas las áreas de producción comercial del tejocote, manzana y nuez por lo que futuras medidas de manejo deberán aplicarse en estos espacios y en los alrededores si se desea regular las poblaciones de *Rhagoletis*.

Palabras clave: *Rhagoletis*, nicho ecológico, Maxent.

SUMMARY

Tephritids are a serious phytosanitary problem for various fruit species. For Mexico, the genus *Rhagoletis* is represented by 35 species gathered in 10 groups, of which the group "pomonella", "suavis" "nova" and "cingulata" have a great economic impact on tejocote, apple, capulín, walnuts, cranberries. Given the importance of species of the genus *Rhagoletis* (Foote, 1981), the ecological niche was calculated and the potential distribution of eight economically important species in Mexico was projected to determine their distribution and design where monitoring, trapping, and monitoring programs would be implemented. inspection, and / or quarantine. 850 *Rhagoletis* distribution data were used in the country and the environmental availability was calculated using a correlation niche model with the Maxent algorithm. This was developed by integrating *Rhagoletis* occurrence records with global climatic variables. The greater environmental availability of *Rhagoletis* in Mexico was projected in areas of the biogeographical provinces of the Transmexican Volcanic (center), the Sierra Madre Oriental, the south-central part of the Mexican Altiplano. The variables that influenced the potential distribution of the species: Isothermality, temperature and precipitation. The distribution of these tephritids includes all areas of commercial production of the tejocote, apple and walnut so future management measures should be applied in these spaces and in the surrounding area if you want to regulate the populations of *Rhagoletis*.

Keywords: *Rhagoletis*, ecological niche, Maxent.

1. INTRODUCCIÓN

Tephritidae (Insecta: Diptera) representa a uno de los grupos más diversos de moscas a nivel mundial, generalmente se les conoce como “verdaderas moscas de la fruta”, debido a sus hábitos de alimentación sobre el tejido vivo de diversas plantas silvestres y cultivadas (frutales y hortalizas) (Skevington y Dang, 2002). Algunas especies tienen gran importancia económica constituyendo un grave problema fitosanitario (Aluja, 1993). Otras se alimentan de semillas, inflorescencias y tallos (Christenson y Foote, 1960). Se distinguen cinco géneros importantes en esta familia: *Rhagoletis* Loew, *Anastrepha* Schiner, *Bactrocera* Macquart, *Ceratitis* MacLeay, y *Toxotrypana* Gerstaecker (White y Elson-Harris, 1994).

El género *Rhagoletis* Loew posee aproximadamente 65 especies descritas, que se distribuyen en las zonas Neártica, Peleártica y Neotropical (Foote, 1981; Hernández-Ortiz y Frías, 1999). *Rhagoletis* ha sido estudiado principalmente por su importancia económica como plaga agrícola de importantes cultivos en muchos países y porque se considera un modelo de procesos de especiación simpátrica (Ramírez *et al.*, 2008).

El conocimiento de la distribución de las especies de *Rhagoletis* es ambiguo en muchos casos, por ejemplo, White y Elson-Harris (1994), establecen que *R. lycopersicella* Smyth se distribuye en Perú, sin especificar si la distribución comprende todo el país o regiones en particular. En México, la distribución de las especies de este género se ha determinado a través de la colecta de frutos infestados, por ejemplo, Rull *et al.* (2006) estudiaron poblaciones de *R. pomonella* que afectan a frutos de ocho especies de *Crataegus* (Rosaceae). Como parte de sus resultados incluyen un mapa donde separan dos poblaciones de esta mosca, sin incluir metodología apropiada, pero argumentando diferencias en orografía, temperatura, precipitación y suelo como factores determinantes. Situación similar ocurrió para *R. cingulata* (Loew) (Rull *et al.*, 2011). En ambos casos, se generan mapas con criterios artificiales para delimitar la distribución de estas especies.

Antiguamente para mapear la distribución de una especie se realizaban inventarios de campo. Los inventarios faunísticos informan dónde han sido encontradas

especies particulares, pero no dónde es más probable que existan por sus requerimientos ambientales (provincias biogeográficas).

Otras formas de representar la distribución geográfica de las especies ha sido el registro dentro de límites políticos (estados, municipios, etc.), o bien, dentro de cuadros de superficie definida (grados o minutos de latitud y longitud o hectáreas o kilómetros cuadrados) (Villaseñor y Téllez-Valdés, 2004), de igual forma sin tomar en cuenta aspectos ambientales.

Con el propósito de estimar con mayor precisión la distribución geográfica de los organismos, se han propuesto diversos modelos predictivos que ayudan a estimar su nicho ecológico potencial (Anderson, 2003). De esta manera, se han propuesto métodos formales y rigurosos para predecir áreas donde pudiera existir el taxón de interés.

Algunos modelos de nicho ecológico, utilizan técnicas discriminantes, y son aquellos que utilizan datos de presencia-ausencia y máxima entropía (Maxent) (Phillips *et al.*, 2006). Otros utilizan técnicas descriptivas, con los registros de presencia de las especies y la información ambiental para generar perfiles bioclimáticos, por ejemplo, BIOCLIM (Busby, 1991) y otras técnicas son mixtas, estos métodos emplean varias reglas, algunas de ellas descriptivas y otras discriminantes, a la vez que generan sus propias pseudoausencias; como GARP (Stockwell, 1999).

Los modelos de nicho ecológico ayudan a determinar dónde se encuentran las condiciones ambientales más adecuadas para que la especie prospere, en función de parámetros obtenidos de colectas previas. Dichos modelos han demostrado utilidad en estudios que evalúan patrones de distribución de organismos, como son algunos análisis biogeográficos, ecológicos o de invasión (Anderson, 2003).

Definir la distribución de especies de insectos de importancia económica es el insumo básico para desarrollar planes de monitoreo y manejo (López-Martínez *et al.*, 2016; Pérez-De La O *et al.*, 2016; Luna *et al.*, 2017) además son la base sobre la cual se estructuran estudios avanzados de taxonomía, ecología, biogeografía (Peterson, 2001; Peterson *et al.*, 2002).

Estas metodologías emergentes serán útiles para generar información completa de las especies de interés, como es el caso de especies de *Rhagoletis* de importancia agrícola para México.

1.1 Género *Rhagoletis* spp.

1.1.1 Importancia del género

Las moscas de la fruta son consideradas como una de las principales plagas que afectan la fruticultura a nivel mundial (Aluja, 1993). Para América han sido citadas 37 especies del género *Rhagoletis*, algunas de ellas poseen importancia económica, viviendo en asociación con plantas cultivadas tales como: manzana (*Malus domestica* Mill), tejocote (*Crataegus mexicana* Moř. & Sess, ex DC) (Rull *et al.*, 2006), nogal (*Juglans regia* L.) (Rull *et al.*, 2013), pepino (*Cucumis sativus* L.), tomate (*Solanum lycopersicum* L.) (Frías *et al.*, 1991), arándano (*Vaccinium* spp.) Smith *et al.* (2001), cerezo y capulín (*Prunus cerasus* L. *P. avium* L., *P. serotina* Ehrhart) (Rull *et al.*, 2011; Yee *et al.*, 2014).

Para México el género está representado por 35 especies reunidas en 10 grupos, de los cuales los grupos "striatella", "cingulata", "pomonella" y "suavis" (Bush, 1966), son de importancia económica. El grupo "cingulata" lo conforman *R. indifferens* Curran, *R. osmanthi* Bush, *R. chionanthi* Bush (Bush, 1966) y *R. turpiniae* Hernández-Ortiz (Yee *et al.*, 2014).

Dentro del grupo *pomonella* se encuentran *R. pomonella* Walsh, *R. mendax* Curran, *R. zephyria* Snow y *R. cornivora* Bush (Bush, 1966). El grupo "suavis" comprende cinco especies: *R. boycei* Cresson, *R. completa* Cresson, *R. juglandis* Cresson, *R. ramosae* Hernández-Ortiz y *R. zoqui* Bush (Hernández-Ortiz, 1985).

A continuación, se presenta un cuadro con información obtenida de especies *Rhagoletis* de importancia económica y sus plantas asociadas (cultivadas y silvestres) (Cuadro 1).

Cuadro 1. Especies de *Rhagoletis* y sus plantas hospederas.

Espece	Plantas Hospederas
<i>R. pomonella</i>	<i>Crataegus mexicana</i> Moř. & Sess, ex DC <i>C. macracantha</i> Lodd. ex Loudon <i>C. chrysocarpa</i> Ashe <i>C. douglasii</i> Lindl. <i>C. erythropoda</i> Ashe <i>C. monogyna</i> Jacq. <i>C. rosei</i> Eggl. <i>C. viridis</i> L. <i>C. baroussana</i> Eggl. <i>C. cuprina</i> J.B. Phipps <i>C. greggiana</i> Eggl. <i>C. tracyi</i> Ashe ex Eggl. Var. <i>madrensis</i> <i>C. gracillior</i> J.B. Phipps. <i>Malus domestica</i> Mill
<i>R. completa</i>	<i>Juglans mollis</i> Engelm. <i>J. hirsuta</i> W.E. Manning
<i>R. zoqui</i>	<i>J. mollis</i> Engelm. <i>J. regia</i> L. <i>J. pyriformis</i> Liebm
<i>R. cerasi</i>	<i>Prunus cerasus</i> L.
<i>R. cingulata</i>	<i>P. serotina</i> Ehrhart var. <i>Capulli</i> <i>P. serotina</i> Ehrhart var. <i>Virens</i> <i>P. pennsylvanica</i> L. <i>P. virginiana</i> <i>P. avium</i> <i>P. cerasus</i>
<i>R. juglandis</i>	<i>J. mollis</i> Engelm. <i>J. pyriformis</i> Liebm <i>J. regia</i> L
<i>R. conversa</i>	<i>Solanum nigrum</i> <i>Solanum tomatís</i>
<i>R. suavis</i>	<i>Juglans spp.</i>

Fuente: (Bush, 1966; Yee *et al.*, 2014; Rull *et al.*, 2013; Hernández y Frías, 1999).

1.2 Impacto de especies *Rhagoletis* en la fruticultura nacional.

Los dípteros de esta familia que juegan un papel importante dentro de la fruticultura son: *R. pomonella*, que tiene un rango de hospederos relativamente amplio dentro de la familia Rosaceae (Smith y Bush, 2000). Se puede generalizar que infesta con mayor frecuencia a *Crataegus* spp. (tejocotes), pero muchas poblaciones de moscas se han adaptado a las manzanas cultivadas (*Malus* spp.) (Smith y Bush 2000).

En México la producción de manzano en el norte del país representa una de las actividades frutícolas de mayor importancia agrícola y económica. La producción nacional no es suficiente para abastecer la demanda de esta fruta, por ello es necesario importarla, principalmente de los Estados Unidos, Chile, Canadá y Nueva Zelanda (SIAP, 2017). La superficie cultivada de manzana en México hasta 2017 fue de 54,248 hectáreas con 716 930 toneladas producidas (SIAP, 2017). Los principales estados productores son Chihuahua que aportó el 81% del volumen nacional recolectado, seguido a distancia por Durango y Puebla con 5.9% y 5.2%, respectivamente. Chihuahua es el estado más importante en cuanto a producción; hasta el 2009 con una superficie cosechada de 22,745.28 ha con una producción de 382,955.20 toneladas (SIAP, 2017). El volumen anual promedio de importaciones de manzana ha sido de 135 mil toneladas y Estados Unidos es el principal proveedor con una participación del 72%, le siguen en importancia Chile, Canadá y Nueva Zelanda; se estima que el 50% del mercado de calidad selecta se abastece con fruta importada (SIAP, 2017).

Rhagoletis cingulata pertenece al grupo de especies cingulata. Los huéspedes nativos de *R. cingulata* son la cereza negra o capulín (Cuadro 1) *Prunus serotina*, *P. pennsylvanica*, *P. virginiana* L., *P. avium* (L.), y cereza ácida, *P. cerasus* L. (Bush 1966). En México, los hospedantes son *P. serotina* Ehrhart var. *capuli* (Cavanilles) McVaugh y *P. serotina* Ehrhart var. *virens* (Wooton y Standley) McVaugh (Rull *et al.*, 2011). Aunque la producción comercial de cerezas de México es limitada a 275.98 toneladas, en una superficie cosechada de 70.20 ha (SIAP, 2017), esta especie podría expandir su rango a diversas especies de *Prunus* spp. silvestres o

cultivados como el durazno y el capulín y establecerse en varias áreas en donde estos hospedantes están presentes.

Actualmente México produce más de 227 toneladas de capulín, siendo los estados de México, Puebla y Veracruz los que encabezan la lista y en conjunto aportan el 87 por ciento de la producción es decir 199.84 toneladas del total nacional (SIAP, 2017).

También *Rhagoletis completa* tiene un papel importante en la fruticultura nacional ya que sus principales hospederos incluyen a ocho especies del género *Juglans* spp. (Cuadro 1) (Bush, 1966; Smith y Bush, 2000; Rull *et al.*, 2013). Raras veces ataca al durazno, *Prunus persica* L. Sin embargo, es común en nogales de traspatio, con casi 100% de árboles infestados (Yee y Goughnour, 2008). Debido a que las nueces no se cultivan comercialmente (a gran escala) en ese sitio. La producción de nuez de castilla (*Juglans regia* L.) en México, se obtiene de forma tradicional desde hace tres siglos y se concentra en Puebla, Tlaxcala, Estado de México, Oaxaca y Querétaro. Según SIAP (2017) el cultivo de nogal se siembra en 77 581.99 ha.

La mosca europea de la cereza, *R. cerasi*, es la plaga más importante de cerezas dulces en Europa. Sin tratamiento con insecticidas, se puede infestar hasta el 100% de las frutas. *Rhagoletis cerasi* plantea un desafío para los productores de cerezas porque el nivel de tolerancia del mercado para los daños de la fruta es relativamente bajo, con un máximo de 2% de frutas infestadas reduciendo considerablemente el precio de mercado, lo que causa graves problemas financieros (Daniel y Grunder 2012).

Rhagoletis zoqui es una especie endémica de las montañas de la región central de México, en donde se conocen tres especies de nogal de las cuales se alimenta: *Juglans mollis* Engelm. (Tamaulipas, Hidalgo, Querétaro, San Luis Potosí); *J. pyriformis* Liebmann (Veracruz); y *J. regia* L. (Distrito Federal, Tlaxcala, Veracruz, y Puebla) (Bush, 1966; Rull *et al.*, 2013). Los procesos de alimentación de las larvas de *R. zoqui* en frutos reducen su producción y los hacen vulnerables al ataque de patógenos, indirectamente afectando el costo de medidas de control y el comercio nacional en el caso de especies cultivadas (Vitaluña *et al.*, 2010). Es de vital

importancia llevar a cabo métodos preventivos y de control, para llevar un manejo integrado de estos insectos plaga.

Una estrategia adicional para conocer la distribución de estas especies y facilitar el movimiento de fruta a diferentes mercados extranjeros es predecir qué áreas cuenten con la disponibilidad ambiental para estas moscas, como lo son los modelos de nicho ecológico (MNE) que predicen la idoneidad ambiental para una especie (Kriticos *et al.*, 2003; Phillips *et al.*, 2006; Warren y Seifert, 2011) y se usan comúnmente y pueden emplearse para este fin. Estos modelos se han utilizado para predecir las posibles distribuciones de moscas de la fruta tefrítidas (Kumar *et al.*, 2014; Isabirye *et al.*, 2015), incluida la mosca de la manzana (Kumar *et al.*, 2016).

1.3 Teoría del nicho ecológico y conceptos asociados

Uno de los conceptos de mayor importancia en ecología es el de nicho, en el sentido de que ha sido usado desde principios del siglo XX para tratar problemas fundamentales en ecología, tales como los factores que afectan las áreas de distribución geográficas de las especies, la composición y estructura de las comunidades ecológicas. Históricamente se mencionarán los conceptos acuñados de mayor importancia en la literatura (Soberón y Nakura, 2009).

Joseph Grinnell (1917) empleó la palabra nicho para referirse al “conjunto de hábitats y comportamiento de una especie”, describe el nicho como los requerimientos ambientales de la especie. Estos incluyen microhábitat, factores abióticos, recursos, depredadores y hacen un especial énfasis en la combinación de adaptaciones fisiológicas y de comportamiento, que le permiten a la especie responder a estos factores.

Elton en 1927, fue uno de los primeros en comenzar a utilizar el término nicho en el sentido del “estado funcional de un organismo dentro de su comunidad”. Debido a la gran influencia de Elton sobre el pensamiento ecológico, se ha conciliado que el nicho no es de ninguna manera un sinónimo de hábitat. Elton subrayó la importancia de las relaciones tróficas, por lo cual el concepto propuesto por Elton se ha denominado nicho trófico (Odum y Warrett, 2006).

Hutchinson G.E. (1957) fue el primero en intentar integrar cada una de las interpretaciones propuestas desde Grinnell y Elton, aunque bajo una perspectiva diferente a la de ambos; él sugirió que el nicho podría visualizarse como un espacio multidimensional o hipervolumen, dentro del cual el entorno permite que el individuo o la especie sobrevivan de manera indefinida. El nicho de Hutchinson puede designarse como nicho multidimensional o hipervolumétrico, es susceptible de medición y puede manipularse matemáticamente. Hutchinson también diferenció entre el nicho fundamental máximo: “el hipervolumen habitado de manera abstracta”, cuando la especie no está restringida por competencia u otras interacciones bióticas limitantes y el nicho real: “un hipervolumen más pequeño ocupado bajo restricciones bióticas específicas” (Odum y Warrett, 2006).

Para 2007, Soberón utilizó una definición operacional de una rama específica de significados de la palabra nicho: los llamados nichos Grinnellianos y analizó algunas propiedades de la evolución de estos nichos. Acuñando el nicho fundamental de una especie como el conjunto de condiciones ambientales que permiten que una población tenga tasas de crecimiento positivas en ausencia de competencia, depredación o enfermedades. La presencia de estos factores dinámicos puede reducir el nicho fundamental, al llamado nicho realizado.

Las variables que dan forma al nicho ecológico de la especie pueden ser bióticas o abióticas, y pueden representarse mediante valores numéricos (como la temperatura), u otros tipos de valores (Soberón y Peterson, 2005). Este hipervolumen representa el nicho fundamental. Hutchinson (1957) además definió el concepto de nicho realizado, como el espacio ecológico y geográfico en el que la especie vive en efecto. Esto debido a dos factores adicionales: Primero, la especie debe ser capaz de alcanzar el lugar, y esto depende por su parte de sus poderes de colonización y el alejamiento del sitio. Segundo, su presencia puede ser impedida por la acción de individuos de otras especies que compiten con la especie o se alimentan de la misma. Por lo general, una especie tiene un lugar ecológico más grande en ausencia de competidores y depredadores. En otras palabras, hay ciertas combinaciones de condiciones y recursos que pueden permitir que una especie

mantenga una población viable, pero sólo si no está siendo negativamente afectada por enemigos (Begon *et al.*, 2006).

1.4 Modelos de nicho ecológico (MNE)

Los modelos de nicho ecológico de las especies, se fundamentan en los análisis de las condiciones ambientales de los sitios con presencias conocidas. Las implicaciones de estas técnicas incluyen elementos de conservación, ecología, evolución, epidemiología, manejo de especies invasoras, entre otros (Peterson *et al.*, 1999).

El objetivo general de estas metodologías de modelado, es predecir la disponibilidad de aspectos ambientales para las especies, en función de su nicho fundamental. Se considera como nicho fundamental a todas las condiciones que le permiten a una especie sobrevivir a largo plazo, mientras que el nicho efectivo se considera una porción del nicho fundamental que la especie actualmente ocupa (Hutchinson, 1957). El nicho efectivo de una especie puede ser menor o incluso mayor al fundamental, debido a la influencia humana, interacciones bióticas (competencia interespecífica, depredación) o barreras geográficas que han obstaculizado su dispersión y colonización (Anderson y Martínez-Meyer, 2004).

1.5 Modelos de distribución de especies (MDS)

Con el desarrollo de las nuevas tecnologías se han creado disciplinas emergentes como los son bioinformática, biogeografía y los sistemas de información geográfica (SIG), que combinan potentes técnicas estadísticas con información ambiental y cartográfica, logrando el estudio de la distribución de especies (MDE) (Guisan y Zimmermann, 2000). Un modelo de distribución de especies es básicamente una caracterización de las condiciones ambientales adecuadas para estas especies, que identifica dónde están espacialmente ubicados los sitios que cumplen con los requerimientos agroecológicos adecuados para el desarrollo de las especies en estudio (Pearson, 2007). Los modelos no son subjetivos y predicen lo adecuada que

es un área para el potencial desarrollo de una determinada especie en relación con las condiciones ambientales (clima, suelo, topografía, etc.) La predicción de distribuciones actuales, potenciales y futuras se ha realizado principalmente siguiendo modelos bioclimáticos que asumen que el clima, al final, es el factor que restringe la distribución de las especies. Estos modelos resumen un número de variables climáticas dentro del intervalo de distribución conocido para una especie dada, generando así una “cobertura bioclimática”. Dichos modelos pueden ser empleados para identificar la distribución actual, potencial y futura de una especie (Beaumont *et al.*, 2005).

Estos modelos se han convertido en una herramienta muy potente y cada vez más usada, tienen un campo amplio de aplicación y han sido empleados para evaluar la amenaza potencial de ciertas especies invasivas, para obtener conocimiento sobre la biología y biogeografía de especies, identificar zonas relevantes para especies amenazadas, predecir biodiversidad con fin de priorizar áreas de conservación, y se ha aplicado en la predicción de la distribución de plagas agrícolas en el país (Luna *et al.*, 2017).

1.6 Diagrama BAM

El diagrama BAM (Soberón y Peterson, 2005) es una representación heurística general de mucha información en forma esquematizada, que nos facilita pensar en torno a los factores bióticos (B), abióticos (A) y de accesibilidad o movilidad (M), que son determinantes para explicar los nichos ecológicos de las especies. Cuando los conjuntos de áreas B, A y M de una especie coordinan geográficamente, se podrán localizar poblaciones de dicha especie, ya que esas localidades serían accesibles, presentarían las condiciones ambientales y las interacciones interespecíficas suficientes, para mantener una tasa demográfica neta positiva. Estas localidades constituyen el área ocupada BAM (Figura 1).

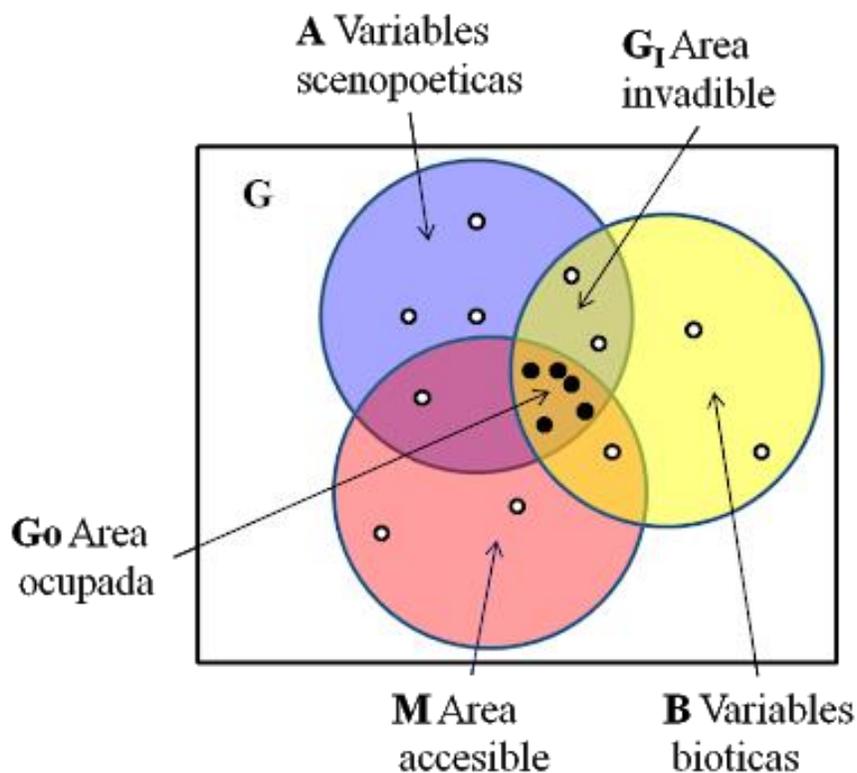


Figura 1. Diagrama BAM (Soberón y Peterson, 2005).

El diagrama BAM se utiliza para entender por separado la influencia de cada uno de los tres factores, pero también para concluir cómo su variación espacial y temporal puede estar afectando la distribución de una especie (Hutchinson, 1957 Soberón, 2007). En este sentido B está compuesto por variables de tipo bióticas (relacionadas dinámicamente con la especie), que caracterizan interacciones interespecíficas (positivas o negativas), incluyendo recursos de los cuales depende la especie de interés. A corresponde a variables escenopoéticas o no dinámicas (no son modificadas, en un sentido amplio, por la especie) y que típicamente son más estables en el tiempo, tales como el clima de una región (Figura 1). Finalmente, M corresponde a una hipótesis del área sobre la cual la especie tiene, o ha tenido, acceso para vivir (Barve *et al.*, 2011).

Cada uno de estos factores se mide y está disponible de manera diferente. La información de B es, por lo general, escasa, ya que generalmente desconocemos cuáles son las interacciones con otras especies y cómo varían éstas a través del

espacio y tiempo. Gran parte de la información de A está disponible a diversas resoluciones espaciales y temporales, por ejemplo, en forma de coberturas bioclimáticas; y M debería calcularse a partir de la capacidad de dispersión de la especie a través del tiempo. En la práctica, debido al amplio desconocimiento de B, se suele operar con los factores A y M, aunque B pueda ser un factor determinante a escalas pequeñas (Figura 1) (Soberón y Nakamura, 2009).

OBJETIVO GENERAL

Definir los nichos ecológicos potenciales de las especies nativas y de importancia cuarentenaria del género *Rhagoletis* (Diptera: Tephritidae) en México.

OBJETIVOS PARTICULARES

- Calcular el nicho ecológico potencial de las especies de *Rhagoletis* con importancia agrícola y cuarentenario para el país.
- Determinar las variables bióticas y abióticas que favorecen la distribución de *Rhagoletis* en México.

HIPÓTESIS

- Las provincias biogeográficas del Altiplano Mexicano y Eje Volcánico Transmexicano son las óptimas para el impacto económico de especies de *Rhagoletis*.
- La temperatura es la variable ambiental que determina la disponibilidad ambiental de *Rhagoletis* en el país.
- El Eje Volcánico Transmexicano es la provincia biogeográfica con mayor diversidad de especies de *Rhagoletis*.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2. 1. Datos de presencia

Los registros de presencia de ocho especies del género *Rhagoletis* se obtuvieron a partir de cuatro vías: 1) Revisión de literatura científica actualizada (Frías, 2001; Bush, 1966; Foote, 1967, 1981; Hood *et al.*, 2013; Michel *et al.*, 2007; Muñoz-Reyes *et al.*, 2014; Nieto-Angel *et al.*, 2016; Rull *et al.*, 2006; Rull *et al.*, 2013; Moral *et al.*, 2015; Hernández-Ortiz *et al.*, 2004; Yee *et al.*, 2014). 2) Consulta de colecciones entomológicas: Colección Nacional de Insectos UNAM, Colección entomológica IEXA INECOL, Junta Local Frutícola CESVMOR, Colección Nacional del Centro de Referencia Fitosanitaria SENASICA, Colección Entomológica del Instituto de Fitosanidad COLPOS, Instituto de Entomología UMCE. 3) Consulta de bases de datos electrónicas mundiales de diversidad (GBIF, iDIGBio). 4) Muestreo en campo, colectando frutos con presencia y picadura de moscas.

Los datos obtenidos fueron depurados en varias fases antes de iniciar la modelación de cada especie: primero se eliminaron datos repetidos y posteriormente, se excluyeron aquellos mal georreferenciados y/o que no contaran con información geográfica precisa de provincia y localidad.

2. 2. Base de datos

La información obtenida fue incorporada a una hoja de Excel® (Microsoft Inc., USA), en varias columnas con la estructura siguiente: Especie, país, estado, localidad, latitud, longitud, hospedera, cita bibliográfica. Los valores de latitud y longitud fueron expresados en grados minutos. Los datos de distribución fueron revisados empleando gazetter (Instituto Nacional de Estadística y Geografía; <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geoestadistica/catalogoclaves.aspx>) o fueron georreferenciados empleando la aplicación Google Earth® ver 7.1.2.2041 (Google Inc., USA). Registros erróneos fueron eliminados de la base de datos.

De los 1218 datos iniciales, obtenidos de artículos científicos, bases de datos, colecciones entomológicas y colectas; se emplearon para crear los modelos (Cuadro 2).

Cuadro 2. Especies y registros utilizados para la modelación de nicho ecológico.

<i>Especie</i>	Cantidad de puntos utilizados
<i>Rhagoletis cerasi</i>	226
<i>Rhagoletis cingulata</i>	116
<i>Rhagoletis completa</i>	58
<i>Rhagoletis conversa</i>	40
<i>Rhagoletis juglandis</i>	26
<i>Rhagoletis suavis</i>	27
<i>Rhagoletis pomonella</i>	313
<i>Rhagoletis zoqui</i>	44

2.3 Área de estudio

Se delimitó para cada especie el área accesible o “M”, de acuerdo a la metodología para realizar modelados de nicho y a la terminología del diagrama BAM (Figura 1) esta área es específica para cada especie y depende de la información biológica conocida (Barve *et al.*, 2011).

Es probable que diferente área a modelar produzca diferentes modelos de respuesta, por lo que se sugiere definir cuál es el área que se está modelando, ya que existen diferentes tipos de áreas de distribución, cada una con diferentes propiedades (Soberón y Peterson, 2005). En otros estudios esta área ha sido delimitada utilizando otras aproximaciones, como regiones bióticas, por ejemplo, unidades climáticas y geográficas que poseen organismos que comparten semejantes adaptaciones ambientales e históricas (Barve *et al.*, 2011).

Para este estudio se utilizaron ecorregiones terrestres, siendo estas un conjunto geográficamente particular, con comunidades naturales que comparten la mayoría de sus especies y sus dinámicas ecológicas, así como condiciones ambientales similares (Sarukhán *et al.*, 2009). El área accesible para las especies fue delimitada utilizando las ecorregiones terrestres clasificadas por Olson *et al.* (2001)

correspondientes al centro y norte del país, parte del sur de Estados Unidos y Europa.

2.4. Proyección de puntos y determinación del área “M”

Para la manipulación de datos en el espacio geográfico se utilizó el software ArcMap en su versión 10.3.3, en el cual se proyectó la capa de ecorregiones del mundo propuestas por Olson *et al.* (2001) esta capa se utilizó para proyectar los puntos de distribución.

Posteriormente, para evitar problemas de sobre modelación, los puntos de presencia se depuraron para dejar un sólo registro por celda cada 10, 5 y 3 km, esto se realizó desde el software ArcMap versión 10.3.3 con la herramienta “*Create Random Points.*” Esta herramienta selecciona un solo punto geográfico dado en un diámetro sugerido por el usuario. En este trabajo se sugirió realizar el *randompoint* considerando el número total de registros que se contaban por especie.

Para *Rhagoletis pomonella* y *R. cerasi* se dejaron 10 km de distancia entre cada punto georreferenciado, para *R. zoqui*, *R. cingulata* y *R. juglandis* 5 km, y para *R. completa*, *R. suavis* y *R. conversa*, 3 km.

El criterio para determinar el área “M” fue reducir las ecorregiones al área accesible para cada especie; es decir, al conjunto de sitios que la especie ha tenido tiempo de explorar desde una fecha dada (origen, la última glaciación o su introducción a un nuevo continente).

Para poder recortar el área M de cada especie se seleccionaron las ecorregiones que coincidían con la ubicación de los sitios de registros y las ecorregiones limitantes tomando en cuenta la capacidad de dispersión de la especie.

Ya seleccionadas las ecorregiones precisas y con la ayuda de las herramientas en “*Arctoolbox*” se recortó el área accesible M, quedando solo esa sección en el mapa. Se realizó una última separación de registros ya proyectados en M, utilizando la herramienta “*GRID*”, esto con el objetivo de obtener puntos de evaluación, tomando como referencia 70 % de los registros de la especie para generar los modelos y el restante 30 % como datos para la evaluación, y en cada réplica se utilizó validación

cruzada que consiste en replicar los datos para la elaboración de los modelos y esos mismos datos sirvieron para evaluar el siguiente modelo.

2. 5. Variables bioclimáticas

Para la realización de los modelos de nicho, se utilizaron un set de 15 variables bioclimáticas (BIOCLIM) (Cuadro 3) del presente, procedentes de la base de datos de WorldClim (disponible en <http://www.worldclim.com>) y descritas por Hijmans *et al.* (2005) con una resolución de 2.5 min. en formato *Raster*, recortadas específicamente para México utilizando información proveniente de estaciones climáticas.

Cuadro 3. Variables ambientales bioclimáticas¹ que se emplearon en la modelación de áreas de distribución para especies del género *Rhagoletis*.

Variable	Descripción
BIO1	Temperatura media anual
BIO2	Media del rango diurno (media de no.ly (temp max- temp min))
BIO3	Isotermalidad (B2/B7)(*100)
BIO4	Temporalidad de la temperatura (desviación estándar*100)
BIO5	Temperatura máxima del mes más cálido
BIO6	Temperatura mínima del mes más frío
BIO7	Rango de temperatura anual (P5-P6)
BIO10	Temperatura media del cuartil más cálido
BIO11	Temperatura media del cuartil más frío
BIO12	Precipitación anual
BIO13	Precipitación del mes más húmedo
BIO14	Precipitación del mes más cálido
BIO15	Temporalidad de la precipitación (coeficiente de variación)
BIO16	Precipitación del cuartil más húmedo
BIO17	Precipitación del cuartil más seco

¹version 1.4 (release 3), fuente: www.worldclim.org; Hijmans *et al.* (2005).

Estas capas fueron recortadas y ajustadas al área M para ser utilizadas en los análisis de cada especie.

2.6. Correlación y selección de variables bioclimáticas

Previo a la modelización, se procede a una serie de análisis estadísticos que permiten la selección de las variables que más información aporten al modelo, reduciendo el número de datos que se introducen y eliminando la información redundante.

Existen varios supuestos ecológicos en las variables ambientales que se usan para la generación de estos modelos (Phillips *et al.*, 2006), por lo que la selección de estas capas de información debe ser cuidadosa. Primero, debe existir una correspondencia temporal entre las localidades de ocurrencia y las variables bioclimáticas (Anderson y Martínez-Meyer, 2004). Segundo, las variables deben afectar la distribución de las especies a una escala relevante, determinada por la extensión geográfica y el tamaño del grado del modelo (Pearson *et al.*, 2004). La elección apropiada de las variables ambientales para el modelado de nicho, afecta también el grado en el cual el modelo se pueda generalizar a otras regiones fuera del área de estudio o a otros periodos de tiempo (Phillips *et al.*, 2006).

La cantidad de variables debe ser la mínima para un mejor desempeño del algoritmo, no existe un número ideal de variables para ser utilizadas, pero se ha demostrado que un incremento de éstas puede llevar a un sobreajuste en la distribución obtenida (Tsoar *et al.*, 2007).

Debido a los requerimientos mencionados, se realizó la selección del set de variables más importantes para las ocho especies y que a su vez no mostraron correlación entre ellas, se empleó, en primer lugar y de manera orientativa, el test de Jackknife generado por Maxent al construir un modelo inicial en el que se introducen las 15 variables (Figura 2).

Variable	Percent contribution	Permutation importance
bio4	47.7	26
bio3	10.2	3.4
bio6	9.9	9.1
bio10	9.7	8.6
bio2	9.1	9.3
bio7	3.8	3.6
bio12	3.3	9.3
bio14	2.4	20.6
bio5	2.1	0.9
bio11	0.7	0
bio1	0.3	2.1
bio13	0.3	0.6
bio16	0.2	0.5
bio15	0.1	5.8
bio17	0.1	0.3

Figura 2. Tabla de la prueba inicial de Jackknife. Recuadro rojo: cinco variables climáticas que mayor porcentaje de información única aportan al modelo.

En la información de salida se determina las variables que han aportado mayor peso en la construcción del modelo. Sin embargo, como se verá más adelante, la selección final de las mismas discrepa ampliamente del test de *Jackknife* (Figura 2). Para la selección de variables se extrajo de los píxeles de cada *raster* los valores correspondientes a la información climática y ambiental, utilizando la herramienta “*extract multi value to point*” de ArcMap 10.3. La tabla de atributos resultante fue exportada a formato *.xls e introducida en el programa estadístico Past en su versión 3.21 (Hammer *et al.*, 2001), en el cual se realizó una tabla correlativa. En la matriz resultante se mostraron las variables que poseían una mayor correlación con las demás, posteriormente se exportaron a una hoja Excel y se realizó un formato condicional de entre 0.80 y -0.80. de esta forma se eligieron las variables por especie menos correlacionadas entre sí (Figura 3).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	
		0 bio1	bio2	bio3	bio4	bio5	bio6	bio7	bio10	bio11	bio12	bio13	bio14	bio15	bio16	bio17	Variable	Percent contribution	Permutation importance		
1		0																			
2	bio1		0.69716	2.46E-10	3.83E-13	6.53E-06	1.08E-36	2.24E-13	1.61E-12	7.80E-40	0.0001551	9.39E-07	0.632	8.52E-09	3.29E-06	0.62464	bio4	47.7	26	0	
3	bio2	0.043624		0	0.0001986	0.10724	0.30994	0.56977	0.30648	0.26227	0.35964	1.16E-05	0.0076252	0.000161	0.097353	0.014545	4.63E-06	bio2	9.1	9.3	0
4	bio3	0.6291	0.39975		0	1.81E-44	0.029268	1.38E-15	4.65E-23	0.35548	9.50E-22	0.0042035	3.91E-08	0.0003007	9.07E-19	1.69E-07	9.04E-05	bio12	3.3	9.3	0
5	bio4	-0.6962	-0.17918	-0.95627		0	0.03103	5.96E-25	9.44E-44	0.67956	9.12E-30	9.33E-06	5.88E-12	0.0077998	5.65E-18	3.72E-11	0.007037	bio14	2.4	20.6	0
6	bio5	0.47496	0.1135	-0.24087	0.23838		0	0.074983	0.018492	1.15E-33	0.089395	0.10505	0.038447	0.36316	0.25198	0.047234	0.38633	bio3	10.2	3.4	1
7	bio6	0.93072	-0.063682	0.7427	-0.85881	0.19772		0	7.94E-30	5.44E-05	1.04E-57	3.46E-07	3.59E-11	0.31429	6.57E-12	2.74E-10	0.40392	bio6	9.9	9.1	1
8	bio7	-0.70107	0.11432	-0.84112	0.95438	0.25964	-0.8953		0	0.94801	1.61E-27	2.20E-09	9.70E-16	0.15881	3.55E-14	3.01E-14	0.2229	bio10	9.7	8.6	1
9	bio10	0.68274	-0.12523	-0.10335	0.046302	0.91697	0.4304	-0.0073123		0	0.000168	0.40031	0.78213	0.04505	0.92288	0.8444	0.039972	bio7	3.8	3.6	1
10	bio11	0.94251	0.10247	0.82746	-0.89492	0.18879	0.97982	-0.87949	0.40389		0	8.36E-06	3.16E-10	0.13124	2.73E-14	1.86E-09	0.13064	bio5	2.1	0.9	1
11	bio12	0.40584	-0.46346	0.31293	-0.46787	-0.18029	0.52788	-0.60197	0.094119	0.47006		0	8.97E-30	0.0006853	0.0059545	2.94E-31	4.36E-05	bio11	0.7	0	1
12	bio13	0.51088	-0.29267	0.56209	-0.66992	-0.22907	0.6509	-0.74533	0.031008	0.62611	0.89497		0	0.84592	3.22E-10	1.45E-54	0.57691	bio1	0.3	2.1	1
13	bio14	-0.053673	-0.40493	-0.38929	0.29187	0.10172	-0.1125	0.15705	0.22196	-0.16806	0.3674	0.021792		0	9.66E-12	0.82614	3.00E-59	bio13	0.3	0.6	1
14	bio15	0.58389	0.18433	0.79127	-0.78021	-0.12795	0.66879	-0.717	0.010857	0.71921	0.30125	0.62591	-0.66483		0	1.06E-10	4.76E-11	bio16	0.2	0.5	1
15	bio16	0.4881	-0.26898	0.53951	-0.65052	-0.2198	0.62784	-0.7184	0.022009	0.60417	0.90401	0.97577	-0.024631	0.63882	0	0.75605		bio15	0.1	5.8	1
16	bio17	-0.054834	-0.48164	-0.41873	0.29548	0.096928	-0.093403	0.13606	0.22734	-0.16832	0.43535	0.062509	0.98155	-0.64782	0.034832	0		bio17	0.1	0.3	1
17																					

Figura 3. Análisis de correlación. Resaltados en rojo valores no admisibles de correlación (superiores al valor 0.80 o -0.80). Consultar Cuadro 3 para la definición de cada variable bioclimática.

Ya que se contaba con la información de las variables bioclimáticas que aportan al modelo y el área “M” por especie, se continuó con la metodología de modelación ingresando toda esta información final al algoritmo Maxent versión 3.3.3.

Es decir, se optó por incluir las variables bioclimáticas de interés en una capa de la República Mexicana ya que proyectarlas en esta capa de información es el objetivo de la presente investigación.

2.7. Modelación de espacio ambiental

Posteriormente para modelar el nicho potencial de *Rhagoletis* se empleó el algoritmo de máxima entropía MaxEnt version 3.3.3 (Phillips *et al.*, 2006). Éste aplica el principio de máxima entropía para calcular la disponibilidad ambiental más adecuada para una especie. De este modo, el modelo de predicción de cada especie se proyectó en un mapa que representa las áreas adecuadas o no adecuadas para la presencia de dicha especie (Phillips *et al.*, 2006).

Los siguientes valores del modelo fueron empleados por default: número máximo de iteraciones (500), umbral de convergencia (0.00001), ejecución tipo replicado (10 análisis con el 90% de puntos de entrenamiento y 10% con puntos de validación), puntos de fondo (10,000) y valores de regularización (1), así como el rechazo de datos duplicados de ocurrencia en las celdas de las variables ambientales. El programa genera las curvas en respuesta de las especies a las

variables evaluadas, y considera la importancia de cada una de éstas en la distribución de la especie (Phillips *et al.*, 2006).

2.8. Calibración del modelo

Para calibrar el modelo se introdujeron los datos en la interfaz principal del software como se ve en la Figura 4, en *Samples*, la base de datos con los puntos de presencia en formato *.csv el cual constó de tres campos (especie, longitud y latitud) y en *Environmental layers* las capas bioclimáticas en formato *.asc, únicamente seleccionadas las que mayor aportaron al modelo según la correlación calculada.

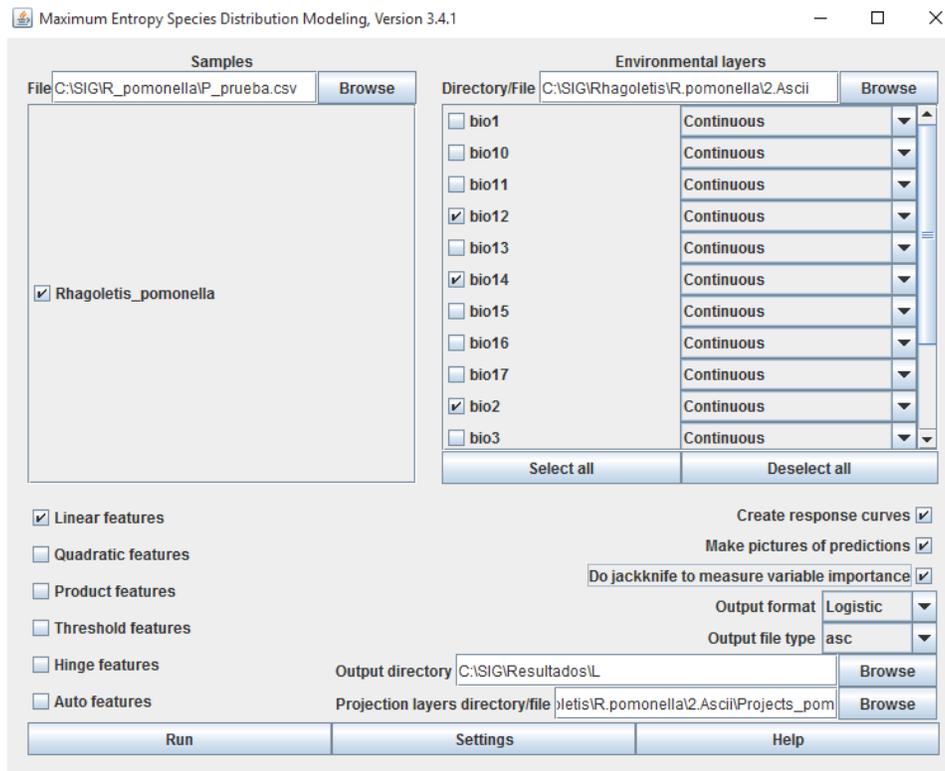


Figura 4. Interfaz principal de Maxent diseñada para la introducción de datos de presencia y variables bioclimáticas.

Una vez introducidos los datos necesarios para generar el *background*, se deben considerar otros factores que influyen en los resultados. En primer lugar, el formato del modelo que se usa es *logistic* que, por su facilidad para interpretar los

resultados, es el más utilizado. Éste indica la probabilidad de presencia relativa de la especie, es decir, los píxeles con mayores valores presentarán una mayor idoneidad para la especie. Los valores de los mapas resultados oscilan entre 0 y 1 y solamente representan una mayor o menor idoneidad, no una probabilidad de presencia.

En segundo lugar, el software, tras distribuir todos los valores de probabilidad en los datos de presencia y el *background*, realiza un proceso de ajuste del modelo mediante las "*features*" o funciones que se consideren más acertadas (Merow *et al.*, 2013). Existen distintas posibilidades. *Auto features* es el modo mediante el que Maxent elegirá automáticamente o por default las funciones que considere más adecuadas. Otra opción es desmarcar *auto features* y elegir las funciones que se consideren más adecuadas.

En el caso de esta tesis se generaron 22 combinaciones de estas *Features* por especie con el fin de obtener resultados con el mayor sentido ecológico posible.

Además de la selección de las funciones que dan lugar a las predicciones, también se varían otros parámetros que se encuentran en la pestaña *Settings* cuya interfaz se muestra en la Figura 5.

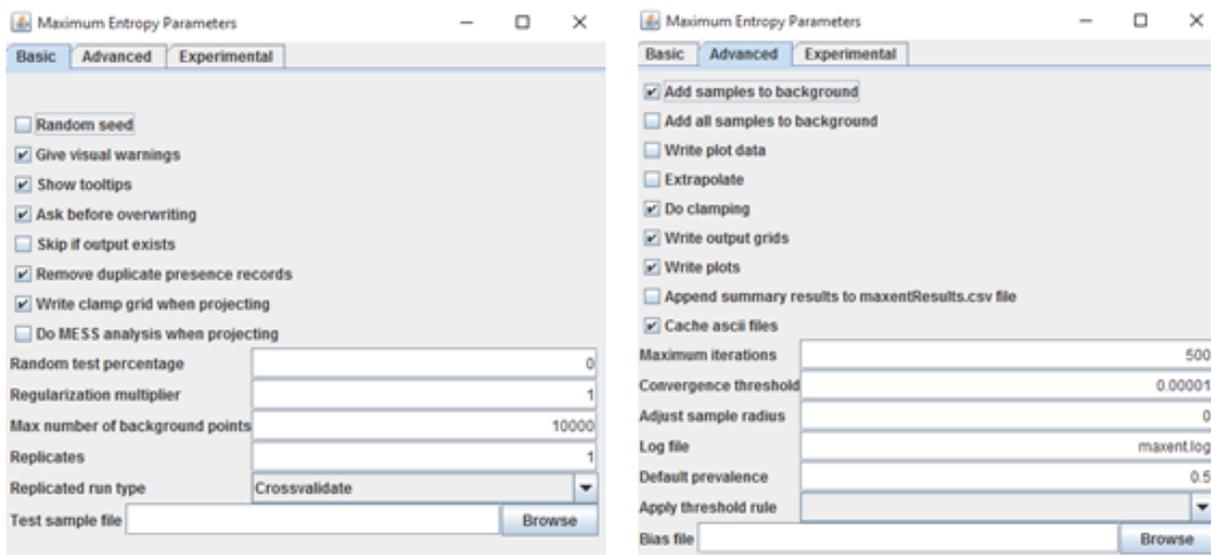


Figura 5. Interfaz *Settings* del software Maxent, diseñada para la introducción de parámetros en la modelación de nicho de especies de *Rhagoletis*.

Otro paso para la calibración de los modelos consiste en la variación del parámetro *Regularization multiplier* que designa la complejidad matemática del modelo. En el caso de esta tesis se generan modelos con 1 o *Default*. Cuanto menor sea este factor, mayor será la restricción de la complejidad de las funciones y, por lo tanto, mayor será el ajuste de las predicciones a los puntos de presencia. Finalmente, al utilizar unas variables de elevada precisión, el número de píxeles con el que trabaja el algoritmo es muy elevado y esto deriva en la necesidad de un amplio *Max number of background points* que, como muestra la Figura 5, en esta tesis se ha establecido en 10000 datos que son elegidos de manera aleatoria por Maxent para caracterizar el nicho de la especie. Se reservó el 1% de los datos de presencia (ver *Random test percentage* en Figura 5) para la validación del modelo, usando el 99% de los mismos para construirlo. Se eligieron un máximo de 1000 iteraciones y se omitió la selección de la opción *Extrapolate*. Ya calibrado el software se corrieron las 22 repeticiones por especie, donde cada resultado se guardó en carpetas identificadas con sus formatos *“.ascii”* y *“.htm”*.

2.9. Cálculo de valor AICc (*Akaike Information Criterion for small sample sizes*).

El AICc es un estadístico ajustado a muestras de pequeño tamaño, que permite la comparación de modelos teniendo en cuenta la complejidad de los mismos (Burnham *et al.*, 2003). A través de éste se facilita la selección del modelo menos complejo, con una capacidad de predicción igual a la de un modelo de mayor complejidad (Johnson y Omland, 2004).

Para evaluar el ajuste de cada modelo y seleccionar el mejor modelo se utilizó el criterio de información AICc, ajustado al tamaño de la muestra y parametrización del modelo (Johnson y Omland, 2004). Se utilizó el paquete estadístico RStudio versión 3.4.4 (2018) que interacciona con Maxent permitiendo calcular similitudes y realizar comparaciones estadísticas (Warren *et al.*, 2010).

En la Figura 6 se presenta la interfaz principal del software, donde mediante las herramientas se corrieron 25 scripts, se introduce un archivo formato *“.csv”* donde

se encuentran los registros por cada especie de *Rhagoletis* para evaluar, se introdujeron las rutas de los datos de presencia (*.csv) y las variables bioclimáticas que mayor aportaron en formato "*.asc." de cada modelo que se quiera comparar.

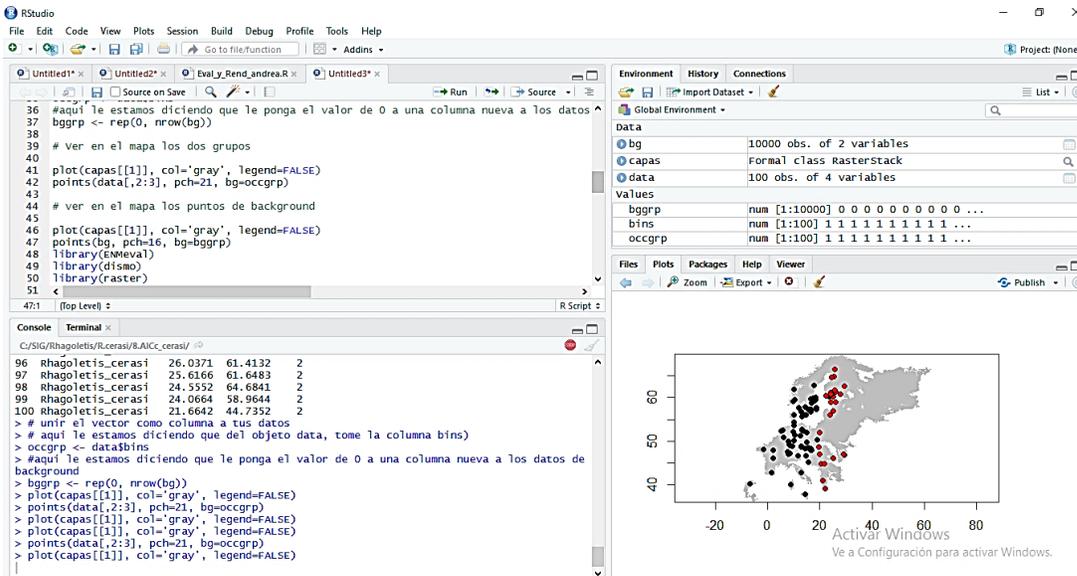


Figura 6. Interfaz del Software Rstudio para el calculo de AICc.

También se utilizó el software Enmtools el cual interactúa con el programa de Maxent, lo que permite a los usuarios automatizar la generación de ENM, calcular medidas de similitud e implementar diversas comparaciones estadísticas (Warren *et al.*, 2010).

2.10 Evaluación de los modelos

Los modelos finales fueron validados a partir de dos procesos, en el primero se consideró el valor AICc calculado con RStudio y EnmTools, evaluando las 22 réplicas generadas por especie, este valor estadístico castiga la parametrización del modelo como se explicó anteriormente, entre menor sea el valor de AICc es más significativo. RStudio genera una tabla de resultados donde no solo incluye el valor AICc, también valores de Tasa de Omisión y parametrización.

Otro método estadístico para evaluación adicional utilizado fue el análisis de ROC Parcial para validar el modelo elegido para cada especie (Peterson *et al.*, 2008), y se calculó por medio de Niche Tool Box (Osorio-Olvera, 2018). Para el análisis se utilizaron los puntos prueba, es decir el 70% de los registros independientes y cada uno de los 29 modelos finales en formato “*.ascii”. De éste, se extrajeron los datos *Partial-ROC* arrojados por la plataforma, estos contienen valores con decimales, por lo que fue multiplicado por 1000 y sus valores transformados a enteros, se utilizó una $p < 0.5$ para corroborar que los modelos fueran significativos.

Los valores obtenidos con RStudio-EnmTools y Niche Tool Box, se colocaron en una hoja de Excel (Microsoft Office 2016), con el siguiente orden: *Especie*, *Replica*, *Valor AICc*, *Tasa de Omision*, *ROC Parcial* y *Parametrización*. Para la selección de los mejores modelos por especie se optó por tomar en cuenta el valor más bajo de AICc, el modelo menos parametrizado y de ROC parcial.

2.11. Proyección en espacio geográfico

Para la edición de los mapas finales se utilizó ArcMap en su versión 10.3. La capa de información geográfica utilizada fue la de provincias biogeográficas establecidas por Morrone (2014) (Figura 7). El mejor modelo de entre cada 22 réplicas se eligió exportando la capa “*.ascii” a ArcMap y editando el mapa con la capa geográfica de provincias biogeográficas.

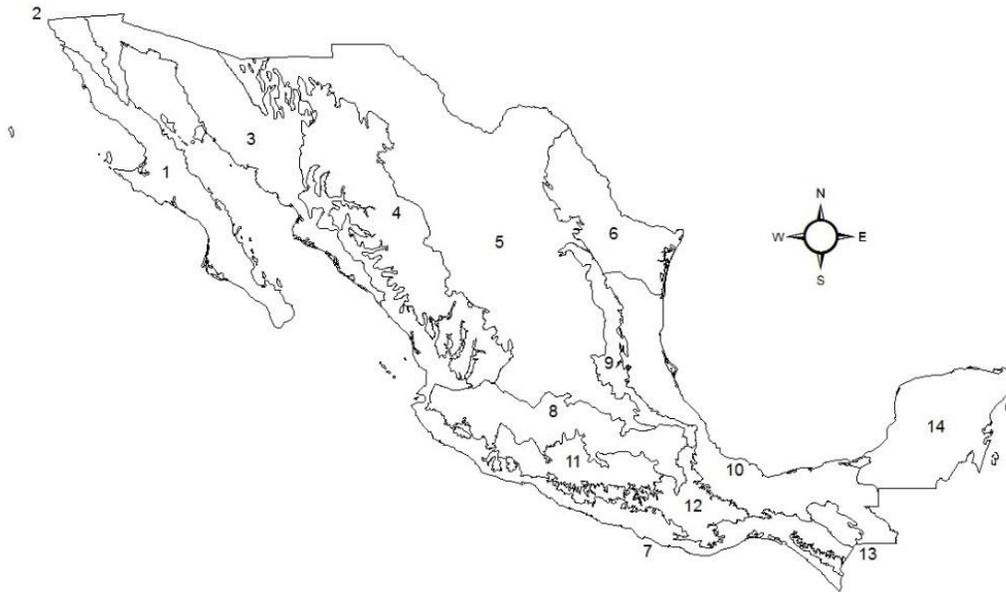


Figura 7. Provincias biogeográficas, 1= Baja California, 2= California, 3= Sonora, 4= Sierra Madre Occidental, 5= Altiplano Mexicano, 6= Tamaulipeca, 7= Costa Pacífica Mexicana, 8= Eje Volcánico Transmexicano, 9= Sierra Madre Oriental, 10= Veracruzana, 11= Cuenca del Balsas, 12= Sierra Madre del Sur, 13= Chiapas, 14= Yucatan (Morrone, 2014).

Cada uno de los mapas presentados se dividió en tres porcentajes de probabilidad que indica la presencia de las condiciones climáticas necesarias para la ocurrencia de las especies. El porcentaje de 100%, indica el límite máximo que se obtuvo para posible presencia de cada especie y se muestra en color rojo. El segundo porcentaje (50%) indica media disponibilidad y el tercero (0%), nula disponibilidad, de acuerdo al algoritmo Maxent.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Evaluación de los modelos

Los resultados (Cuadro 4) resaltan los mejores estadísticos para cada modelo por especie, que son los que presentan el menor valor AICc, parametrización, tasa de omisión y ROC Parcial.

Cuadro 4. Modelos más significativos y los valores estadísticos que presentaron.

Especie	Replica*	Valor de AICc**	Tasa de omisión	ROC Parcial	Parametrización
<i>R. cerasi</i>	LP*	852.5540	NA	0	7
<i>R. cingulata</i>	LQP	868.6213	NA	0	6
<i>R. completa</i>	LP	709.0786	NA	0	3
<i>R. conversa</i>	HLQ	477.1304	NA	0	8
<i>R. juglandis</i>	PL	681.3159	0.2187	0	4
<i>R. suavis</i>	PL	693.5097	1.0000	0	4
<i>R. pomonella</i>	LQP	1996.3120	NA	0	9
<i>R. zoqui</i>	LQ	1249.014	0.0669	0	7

*L, Q, P, T, y H: *linear, quadratic, product, threshold, y hinge* features calibraciones de Maxent.

**AICc es el criterio de información de Akaike para un tamaño de muestra pequeño.

3.2 *Rhagoletis cerasi*

De acuerdo al modelo de nicho ecológico generado, cinco fueron las variables más sensibles y más importantes que limitan la distribución de *Rhagoletis cerasi*: Temperatura media anual, Isotermalidad, Temporalidad de la temperatura, Temperatura máxima del mes más cálido y Temporalidad de la precipitación (Cuadro 5).

Cuadro 5. Variables bioclimáticas y su aportación al modelo de *R. cerasi*.

Variable	Aportación al modelo
Temporalidad de la temperatura	70.8 %
Isotermalidad	12.2 %
Temperatura media anual	10.9 %
Temperatura máxima del mes más cálido	4.7 %
Temporalidad de la precipitación	1.4 %

Con estas 5 variables bioclimáticas se generaron 22 réplicas que dieron lugar a un modelo de nicho ecológico mucho más preciso, en el cuadro 6 se muestran los resultados de dichas réplicas donde se incluyen los valores estadísticos de AICc, ROC parcial, tasa de omisión y parametrización.

El mejor modelo fue el que incluyó como características en la modelación a LP (Cuadro 6).

Cuadro 6. Resumen de los valores estadísticos y réplicas de calibración de los modelos Maxent de *R. cerasi*.

Características (features)	Valor AICc**	ROC parcial	Tasa de omisión	Número de parámetros
LP*	852.5540	0	NA	7
LQP	875.862	0	NA	6
QP	887.9971	0	NA	7
LQ	887.9994	0	NA	6
LQH	949.8920	0	NA	13
LH	959.2188	0	NA	14
LQPH	971.6838	0	NA	15
QH	972.6790	0	NA	15
PH	989.6514	0	NA	16
QPH	1010.5445	0	NA	17
QT	1019.4954	0	NA	17
PTL	1031.6640	0	NA	17
LQT	1086.0757	0	NA	19
LQPTH	1140.2002	0	NA	20
QPT	1151.3281	0	NA	20
PTHL	1240.9201	0	NA	21
LQPT	1248.1388	0	NA	21
PT	1258.1597	0	NA	21
PTH	1443.6829	0	NA	22
LP	852.5540	0	NA	7
LQP	875.8620	0	NA	6
QP	87.9971	0	NA	7

*L, Q, P, T, y H son *linear, quadratic, product, threshold, y hinge* features calibraciones de Maxent.

**AICc es el criterio de información de Akaike para un tamaño de muestra pequeño.

Las áreas con mayor disponibilidad para *R. cerasi* en México se encuentra en las provincias biogeográficas del Altiplano mexicano, Tamaulipeca, norte de la Sierra Madre Oriental, norte de la zona biogeográfica de Sonora, y la Veracruzana (Figura 8).

Media disponibilidad se observa para la zona biogeográfica de Baja California, sur del Altiplano mexicano, Sonora, Eje Volcánico Transmexicano, Cuenca del Balsas, y Yucatán. El modelo también predijo mínima idoneidad para la Costa del Pacífico Mexicano y Sierra Madre del Sur y zonas aisladas del Eje Volcánico Transmexicano. No existe material registrado en publicaciones científicas ni colecciones entomológicas que indiquen que *R. cerasi* se encuentra establecido en México, sin embargo, el amplio rango de *R. cerasi* en Europa y Asia (38 países) (USDA-APHIS-PPQ., 2017) sugiere que la mosca sería capaz de establecerse a través de diversos hábitats en los Estados Unidos y México, incluidos las regiones de cereza donde podría restringir las exportaciones de cerezas a otros mercados, este último con poca producción de cereza, pero si con presencia de plantas hospederas para el díptero (Tewodros *et al.*, 2018).

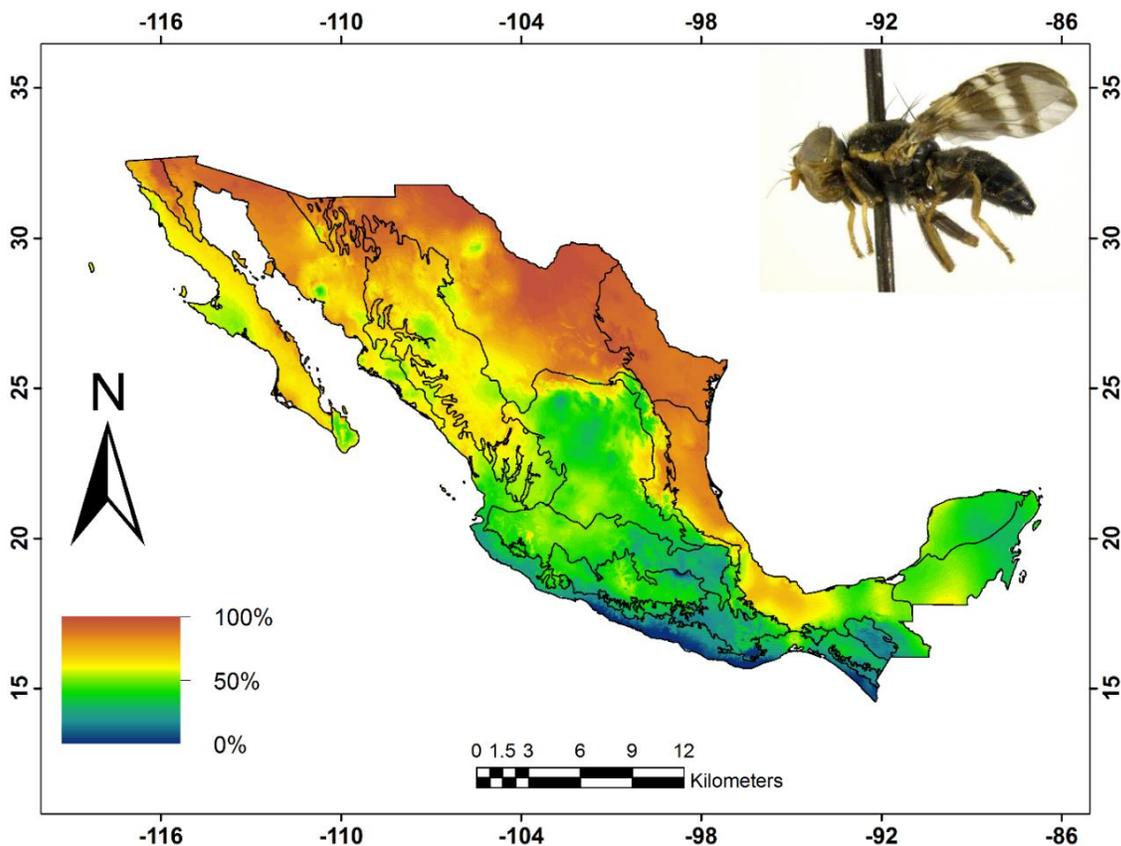


Figura 8. Nicho ecológico potencial de *Rhagoletis cerasi* en México. Escala: High= 100% (Presencia), - Presencia media 50%, Low= 0 (Ausencia).

De acuerdo a la literatura *R. cerasi* ya fue detectada en Norte América en 2016 en Mississauga, Ontario, Canadá (CFIA, 2017). Y en 2017 se detectó en Niágara, Nueva York, Estados Unidos (Anónimo, 2017). Debido a las detecciones de *R. cerasi*, el Servicio de Inspección de Sanidad Animal y Vegetal de Agricultura (USDAAPHIS) de Estados Unidos implementó restricciones para la importación de cerezas de Canadá a los Estados Unidos el 23 de mayo de 2017 (USDA-APHIS, 2017). Su presencia en Canadá y Nueva York ha causado preocupación por los principales estados productores de cerezas de Michigan y Washington.

México importa cereza de Estados Unidos, hasta 2017, 963 toneladas provenientes de California, Oregón y Washington (donde se concentra alrededor de 85 por ciento de la producción de EU). En el país, la producción es menor, de 72 toneladas en 2017, siendo Puebla el mayor productor con 67 por ciento, seguido de Chihuahua,

de donde se consiguió el resto del volumen, de acuerdo con datos del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2017).

En nuestra proyección de nicho ecológico Puebla cuenta con una mínima idoneidad de presencia del díptero, pero Chihuahua presentó máxima idoneidad por lo que se considera importante el resultado ya que coincide con las zonas de producción de cereza en México.

Dentro de las metodologías de nichos ecológicos es de vital importancia conocer las características bióticas de la especie en estudio para entender y analizar si la especie se establecería en los sitios predichos. La biología de la mosca de la cereza ha sido estudiada interminables veces y se concluye que las temperaturas necesarias para la emergencia máxima de adultos son $<5^{\circ}\text{C}$ durante ~ 180 días.

El desarrollo postdiapausa puede ser largo o corto en frío o cálido y debe existir sincronización de ocurrencia con el período de fructificación de la planta hospedera y la estacionalidad del desarrollo, estos dos eventos pueden ser los factores más importantes que determinan la probabilidad de establecimiento de moscas en un área determinada (Tewodros *et al.*, 2018).

Algunas zonas del Altiplano norte mexicano, que según nuestro modelo predice idoneidad de presencia del díptero, registra temperatura en invierno menores a 5°C lo que coincide con la temperatura idónea de emergencia de los adultos (Daniel y Grunder 2012). Con esto discutimos que, si no se toman en cuenta las medidas fitosanitarias de importación de frutos hospederos de *R. cerasi*, este tendría el nicho ecológico adecuado para establecerse en México.

3.3 *Rhagoletis cingulata*

Para esta especie, las variables que mostraron mayor significancia y aportación al modelo fueron Temporalidad de la temperatura, Media del rango diurno, Temporalidad de la precipitación, Isotermalidad y Temperatura media anual. (Cuadro 7).

Cuadro 7. Variables bioclimáticas y su aportación al modelo de *R. cingulata*.

Variable	Aportación al modelo
Temporalidad de la temperatura	43.1 %
Media del rango diurno	40.3%
Temporalidad de la precipitación	15%
Isotermalidad	1.1%
Temperatura media anual	0.5%

Cuadro 8. Valores estadísticos y réplicas de calibración de los modelos Maxent de *R. cingulata*.

Características* (features)	Valor AICc**	ROC parcial	Tasa de omisión	Número de parámetros
LQP*	868.621324	0.02	NA	6
QP	868.83454	0	NA	6
LQ	869.803239	0	NA	6
LQPT	877.170204	0	NA	9
PTL	877.450752	0	NA	9
QPT	877.605039	0	NA	9
QT	877.736725	0	NA	8
PT	883.726761	0	NA	11
LQPH	896.397914	0	NA	13
THLQ	898.37289	0	NA	13
LQPTH	904.221721	0	NA	14
QPTH	904.221721	0	NA	14
PTH	904.284767	0	NA	14
QPH	904.755596	0	NA	14
QTH	907.510054	0	NA	14
QH	908.401262	0	NA	14
PH	914.068463	0	NA	15
HLP	925.970446	0	NA	16
TH	942.653422	0	NA	17

*L, Q, P, T, y H son *linear, quadratic, product, threshold, y hinge* features calibraciones de Maxent.

**AICc es el criterio de información de Akaike para un tamaño de muestra pequeño.

Para *R. cingulata* el modelo de nicho ecológico potencial limitó la predicción de las condiciones adecuadas para la especie a gran parte del Altiplano Mexicano, la zona biogeográfica de California, Baja California y Sierra Madre Oriental. Media disponibilidad fue proyectada para la Sierra Madre Occidental, Sonora, Tamaulipeca, Eje Volcánico Transmexicano y Cuenca del Balsas. Para las provincias biogeográficas Veracruzana, Yucatán y zonas aisladas de la Costa del Pacífico Mexicano y Cuenca del Balsas, se calculó disponibilidad ambiental baja (Figura 9).

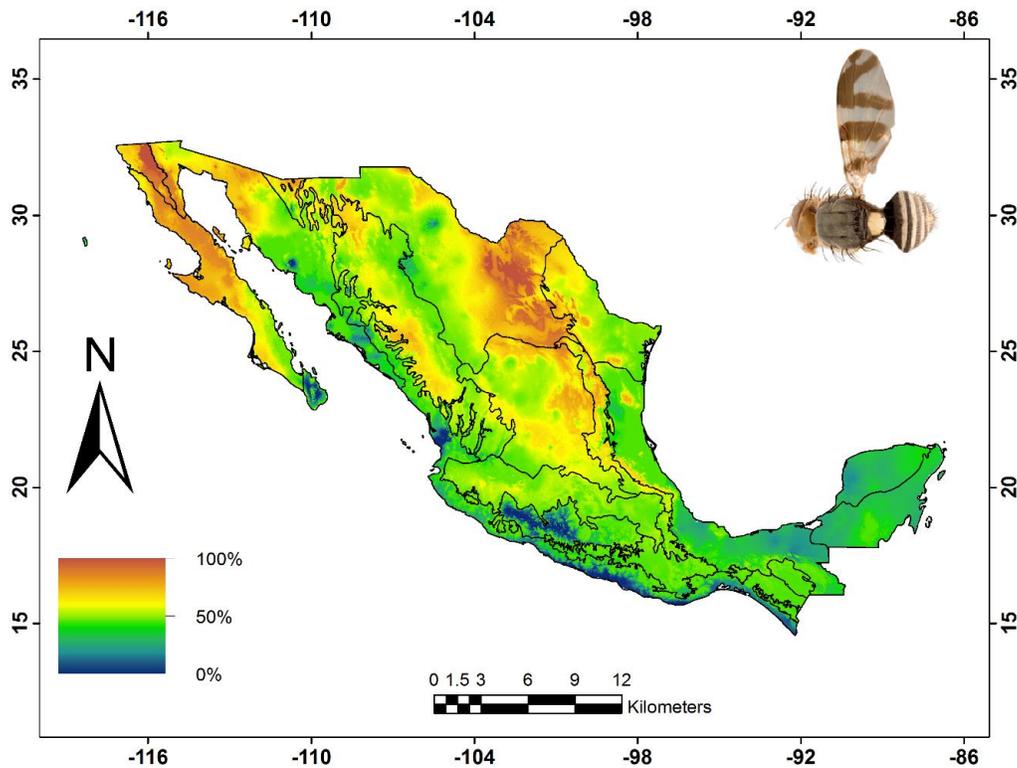


Figura 9. Nicho ecológico potencial de *Rhagoletis cingulata* en México. Escala: High= 100% (Presencia), - Presencia media 50%, Low= 0 (Ausencia).

Lo generado en este modelo de nicho coincide con lo reportado por Tadeo *et al.* (2015) donde menciona que las poblaciones de *R. cingulata* abundan en la Sierra Madre Oriental y el Eje Volcánico Transmexicano, sitios donde se registraron plantas hospederas de esta mosca (plantas con fruto de capulín *Prunus serótina* Ehrh., Rosaceae).

Particularmente Hernández-Ortiz y Frías (1999) informaron que *R. cingulata* parasita a *P. serotina* en Texcoco (Estado de México), Ciudad de México y Puebla que teniendo en cuenta con los resultados del nicho potencial, presentan una media disponibilidad ambiental.

La figura 9 nos indica que el nicho ecológico potencial para *R. cingulata* presenta mayor disponibilidad en el Altiplano Mexicano lo que también coincide con el trabajo de Rull *et al.* (2011), donde mencionan que *R. cingulata* fue reportada en frutos de capulín dentro del altiplano central seco en los estados de Coahuila, Nuevo León y San Luis Potosí. Con los resultados obtenidos se muestra que el modelo de nicho potencial concuerda con lo reportado en los registros científicos actuales.

El capulín es una especie de árbol que crece en zonas templadas, desde el sur de Canadá hasta el sur de Bolivia, y a rango altitudinal de entre 1000 y 3200 msnm en México. Forma parte de los sistemas agrícolas en la región central de México desde la época prehispánica y es la importancia real de esta especie es el resultado de su consumo en el centro de México por sus frutos y su madera (Fresnedo-Ramírez *et al.*, 2011). Y según el nicho ecológico potencial proyectado, el centro de México presenta una media disponibilidad ambiental de esta mosca asociada con plantas de capulín.

Actualmente México produce más de 227 toneladas de capulín, siendo Estado de México, Puebla y Veracruz los que encabezan la lista, y en conjunto aportan el 87 % de la producción nacional (SIAP, 2017).

3.4 *Rhagoletis completa*

Después de realizar la correlación de variables se seleccionaron el siguiente set de variables (Cuadro 9): Rango de temperatura anual, Precipitación del mes más cálido, Media del rango diurno, Isothermalidad y Precipitación del cuartil más seco; las cuales son las de mayor importancia e influyeron en el nicho potencial de esta especie y fueron utilizadas para modelar los 22 escenarios con *R. completa* y con los resultados obtenidos se eligió el modelo más significativo (Cuadro 9).

Cuadro 9. Variables bioclimáticas y su aportación al modelo de *R. completa*.

Variable	Aportación al modelo
Rango de temperatura anual	55.2 %
Precipitación del mes más cálido	25 %
Media del rango diurno	10.4 %
Isotermalidad	7.9 %
Precipitación del cuartil más seco	1.5 %

El modelo seleccionado para esta especie y que tuvo más significancia con los valores estadísticos adecuados fue el calibrado con las opciones LP en Maxent, cuyos valores se pueden observar en el Cuadro 10.

Cuadro 10. Resumen de los valores estadísticos y réplicas de calibración de los modelos Maxent de *R. completa*.

Características* (features)	Valor AICc**	ROC parcial	Tasa de omisión	Número de parámetros
LP	709.08	0	NA	3
LQ	710.81	0	NA	4
QP	711.85	0	NA	4
LQP	711.85	0	NA	4
QP	923.47	0	NA	4
QT	712.36	0	NA	5
LP	926.22	0.06	NA	5
LQP	926.31	0	NA	5
LQ	918.65	0.06	NA	6
LQT	720.34	0	NA	7
LQPT	725.29	0	NA	8
QPT	725.30	0	NA	8
PT	725.75	0	NA	8
PTL	725.77	0	NA	8
LQH	912.85	0.02	NA	8
QH	912.88	0.008	NA	8
LQT	921.20	0.016	NA	9
QT	922.28	0.008	NA	9
QPH	920.22	0.08	NA	10
LQPH	920.27	0.014	NA	10
PH	922.20	0.08	NA	10
LH	922.27	0.01	NA	11

*L, Q, P, T, y H son *linear, quadratic, product, threshold, y hinge* features calibraciones de Maxent.

**AICc es el criterio de información de Akaike para un tamaño de muestra pequeño.

En la representación gráfica (Figura 10) se observa que el área de disponibilidad de esta especie se concentra en partes aisladas al norte de las provincias biogeográficas Tamaulipeca, Altiplano Mexicano y Sierra Madre Oriental con idoneidad alta. Se calculó disponibilidad ambiental media en zonas centrales de la zona Tamaulipeca, Altiplano Mexicano y Sierra Madre Oriental. Disponibilidad baja fue proyectada en la mayor parte del país, en las provincias biogeográficas California, Baja California, Sonora, Sierra Madre Oriental, Eje Volcánico Transmexicano, norte de la zona Veracruzana. Nula disponibilidad fue calculada en Yucatán, Sierra Madre del Sur, Costa del Pacífico Mexicano, Veracruzana y la Cuenca del Balsas.

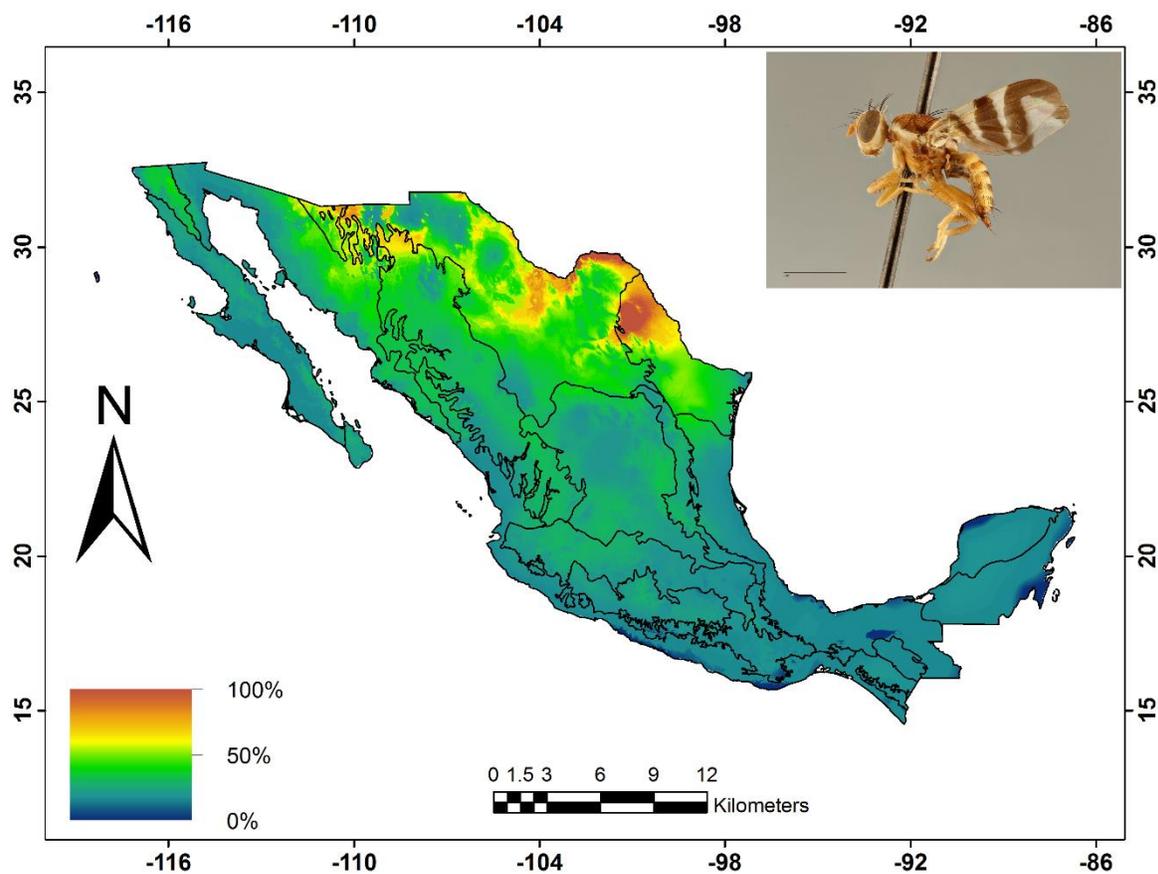


Figura 10. Nicho ecológico potencial de *Rhagoletis completa* en México Escala: High= 100% (Presencia), - Presencia media 50%, Low= 0 (Ausencia).

La distribución de este díptero coincide con lo reportado por Rull *et al.* (2013), donde mencionan que la distribución de *R. completa* abarca desde los estados llanos

centrales en los Estados Unidos, sur de Minnesota hasta Kansas, y luego hacia el noreste de México en los estados de Tamaulipas y Nuevo León.

A pesar de que la mayoría de los registros utilizados en este modelo fueron de Estados Unidos, en el presente estudio encontramos que esta especie no ha sido colectada en Sierra Madre Occidental y norte del Altiplano Mexicano a la altura de los estados de Chihuahua, Coahuila y Sonora, sin embargo, existen condiciones ambientales favorables en caso de llegar a tener accesibilidad en estas zonas biogeográficas, estos estados mencionados ocupan los primeros lugares en producción de Nuez a nivel nacional (SIAP, 2017). *Rhagoletis completa* ha sido colectada, infestando a frutos de *Juglans mollis* (nuez mexicana) en Tamaulipas y *Juglans hirsuta* (nuez de nuevo León) en Nuevo León (Rull *et al.*, 2013), ambos estados productores de Nuez (SIAP, 2017).

La distribución natural de *Juglans molli* en México es incierta. Seguramente en algunas de las localidades donde se ha colectado se trata más bien de individuos cultivados; las etiquetas de los ejemplares de herbario no son claras en este sentido por lo que aproximar a este insecto con su hospedero resulta complicado. Esta planta se distribuye del oriente de Estados Unidos al centro de México, y ha sido reportada en Chihuahua, Coahuila, Nuevo León, Tamaulipas, San Luis Potosí, Guanajuato, Querétaro, Hidalgo, Jalisco, Veracruz y Oaxaca (Manos y Stone, 2001), donde *R. completa* presenta disponibilidad ambiental máxima y media.

3.5 *Rhagoletis conversa*

El resultado del análisis de correlación para la importancia de las variables del modelo final mostró que las variables de mayor peso en el caso de *R. conversa* fueron: Precipitación anual, Isotermalidad, Precipitación del mes más seco y Precipitación del cuartil más seco (Cuadro 11).

Las 22 réplicas generadas con las cuatro variables bioclimáticas elegidas obtuvieron en su mayoría, valores de AICc mayores a 520 y tasa de omisión de NA (Cuadro 12), sin embargo, HLQ fue el modelo elegido ya que obtuvo valores más adecuados

de AICc, tasa de omisión, ROC parcial y complejidad de parametrización (Cuadro 12).

Cuadro 11. Variables bioclimáticas y su aportación al modelo de *R. conversa*.

Variable	Aportación al modelo
Precipitación anual	92.5%
Isotermalidad	4.5%
Precipitación del trimestre más seco	2%
Precipitación del mes más seco	1.1%

Cuadro 12. Resumen de los valores estadísticos y réplicas de calibración de los modelos Maxent de *R. conversa*.

Características* (features)	Valor AICc**	ROC parcial	Tasa de omisión	Número de parámetros
LQ	471.343	0.458	NA	3
QP	474.4502	0.426	NA	3
QPT	474.4502	0.424	NA	3
LQP	474.4503	0.426	NA	3
LQPT	474.4503	0.428	NA	3
PL	474.8641	0.432	NA	3
TL	476.6111	0.444	NA	3
HLQ	477.1304	0	NA	8
QH	477.1304	0.336	NA	8
QTH	477.1304	0	NA	8
THLQ	477.1304	0	NA	8
THQ	477.1304	0	NA	8
PT	488.5767	0.566	NA	2
HL	497.3339	0.47	NA	11
THL	497.3339	0	NA	11
PH	497.3907	0.456	NA	11
PTH	497.3907	0.452	NA	11
TH	497.3907	0.332	NA	11
HLP	497.3966	0	NA	11
LQPH	520.776	0.458	NA	13
LQPTH	520.776	0.456	NA	13
QPTH	520.776	0.454	NA	13

*L, Q, P, T, y H son *linear*, *quadratic*, *product*, *threshold*, y *hinge* features calibraciones de Maxent.

**AICc es el criterio de información de Akaike para un tamaño de muestra pequeño.

Cabe mencionar que esta especie no cuenta con registros en México, todos los registros de presencia utilizados en la construcción del modelo de nicho ecológico se registraron en Sudamérica (Chile y Argentina). En Chile, *R. conversa* se asocia con plantas solanáceas, particularmente *Solanum tomatillo* y *Solanum nigrum* esta última presente en México según los registros de gbif. El ciclo vital de estos dípteros está desfasado estacionalmente y se adaptan a la fenología de sus razas huéspedes que generalmente son muy similares genéticamente (Frías, 2001). Por la capacidad de *R. conversa* de adaptarse a la fenología de sus plantas hospederas, se consideró importante incluir el modelo y proyectar la disponibilidad ambiental y las variables bioclimáticas idóneas de *R. conversa*, en una capa geográfica de México y ya que parasitan solanáceas y México cuenta con plantas de esta familia de carácter económico.

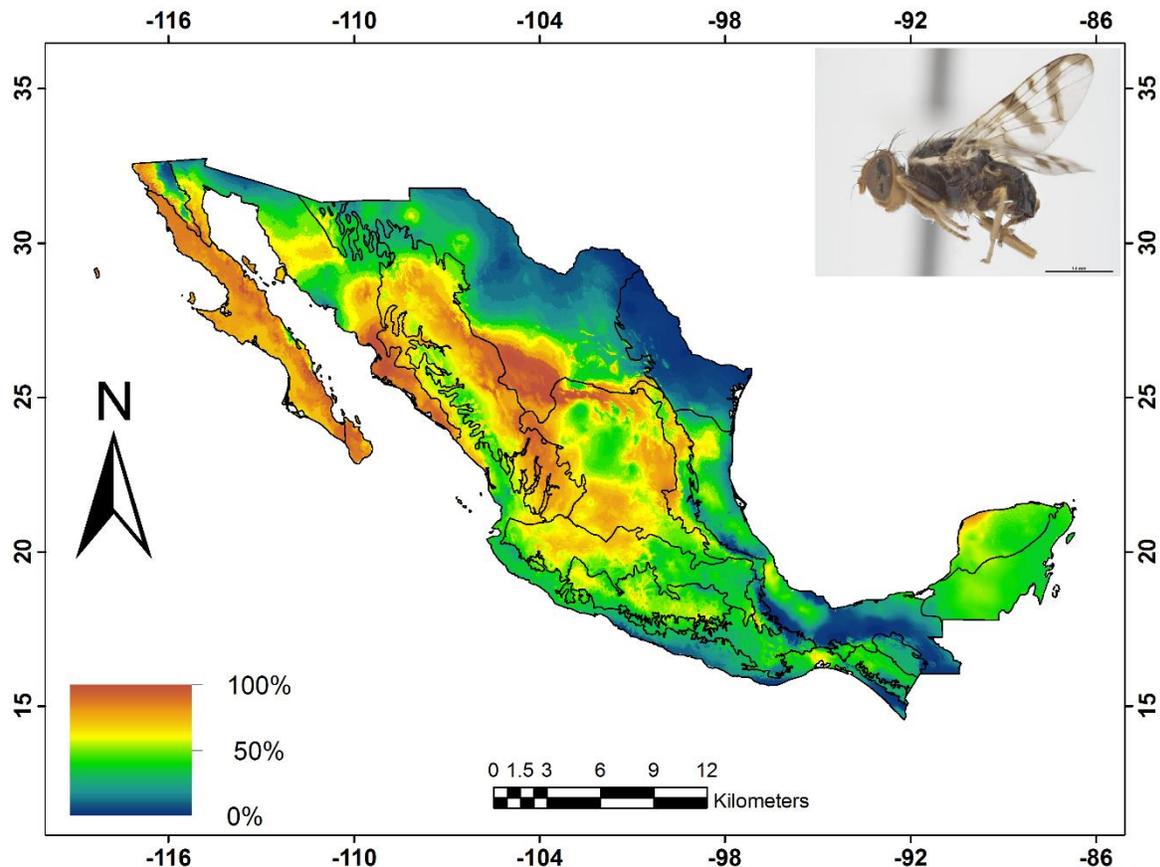


Figura 11. Nicho ecológico potencial de *Rhagoletis conversa* en México. Escala: High= 100% (Presencia), - Presencia media 50%, Low= 0 (Ausencia).

La familia Solanaceae comprende 96 géneros y 23,000 especies (Rzedowski, 1993), y México alberga un número importante de especies y se ha considerado un centro de diversidad para la familia, no solo silvestres si no también cultivadas. Entre ellas, más importantes son tomates (*Solanum lycopersicum* L.) papa (*Solanum tuberosum* L.), chile (*Capsicum spp.*), tomatillos (*Physalis philadelphica* Lam.) y el tabaco (*Nicotiana tabacum* L.) (Martínez *et al.*, 2017).

Se considera importante prestar atención al mapa de nicho potencial que se muestra en la Figura 11, donde podemos observar que algunas regiones de México cuentan con las condiciones ambientales idóneas que pueden ayudar a la distribución de este díptero no registrado en México.

Para *R. conversa* el modelo de nicho ecológico potencial delimitó la predicción de las condiciones adecuadas en gran parte del noroeste del país, en las provincias biogeográficas: California, Baja California, Sonora, Sierra Madre Occidental y gran parte del Altiplano Mexicano (Figura 11).

De acuerdo con análisis biogeográficos cladísticos basados en taxones de artrópodos y plantas (Morrone *et al.*, 1994; Morrone *et al.*, 1997), realizados en zonas sudamericanas, estos grupos se encuentra más estrechamente relacionada con la subregión Subantártica en la parte de Chile central.

Con esta información como antecedente podemos comprobar que ambas regiones, cuentan con características biológicas equivalentes y con plantas hospederas genéticamente similares. En México no se cuenta con registros de la mosca, sin embargo, comparando estos motivos, podemos utilizar los modelados de nicho y las distribuciones geográficas como un foco de alerta para futuras entradas de este tefrítido.

Media disponibilidad ambiental fue calculada en el Eje Volcánico Transmexicano, Cuenca del Balsas, Yucatán y algunas zonas de la Sierra Madre Oriental; mientras que baja disponibilidad se proyectó en Tamaulipeca y Costa Pacífica Mexicana.

3.6 *Rhagoletis juglandis*

Tres variables bioclimáticas (Cuadro 13) fueron las más determinantes en el modelo inicial: Rango anual de temperaturas, Precipitación anual y Precipitación del mes más húmedo.

Cuadro 13. Variables bioclimáticas y su aportación al modelo de *R. juglandis*.

Variable	Aportación al modelo
Precipitación del mes más húmedo	48.2 %
Precipitación anual	46.9%
Rango anual de temperaturas	4.9%

Analizando las 22 réplicas para *R. juglandis* se observó que los modelos presentaron valores de AICc de 653.7064, con alta significancia, sin embargo, se seleccionó el modelo PL por tener menor parametrización (Cuadro 14).

Cuadro 14. Valores estadísticos y réplicas de calibración de los modelos Maxent de *R. juglandis*.

Características* (features)	Valor AICc**	ROC parcial	Tasa de omisión	Número de parámetros
LQ	653.7064	0	0.4375	6
LQP	655.6643	0	0.34375	5
LQPT	655.6643	0	0.34375	5
QP	655.6667	0	0.34375	5
QPT	655.6667	0	0.34375	5
TH	655.8136	0	0.5	13
QH	666.8409	0	0.5	14
QTH	666.8409	0	0.5	14
THQ	666.8409	0	0.5	14
HLP	677.6109	0	0.5	15
PL	681.3159	0	0.21875	4
HL	690.9014	0	0.5	16
THL	690.9014	0	0.5	16
LQPH	692.014	0	0.5	16
LQPTH	692.014	0	0.5	16
QPTH	692.014	0	0.5	16
PH	692.0382	0	0.5	16
PTH	692.0382	0	0.5	16
HLQ	693.2453	0	0.5	16
THLQ	693.2453	0	0.5	16
TL	695.5607	0	0.25	5
PT	699.2948	0	0.25	5

*L, Q, P, T, y H son *linear, quadratic, product, threshold, y hinge* features calibraciones de Maxent.

**AICc es el criterio de información de Akaike para un tamaño de muestra pequeño.

El modelo mostró mayor disponibilidad ambiental en las provincias biogeográficas Baja California, California, Sonora, Sierra Madre Occidental, Altiplano Mexicano, disminuyendo a una mínima predicción en el Eje Volcánico Transmexicano, Cuenca del Balsas y la zona biogeográfica de Yucatán del país. Es decir, *Rhagoletis juglandis* cuenta con registros en la zona norte del país donde se presentó la mayor disponibilidad ambiental, evidentemente se distribuye en el Norte del país. Dos provincias biogeográficas registraron baja disponibilidad: la zona de la Costa Mexicana y la Veracruzana.

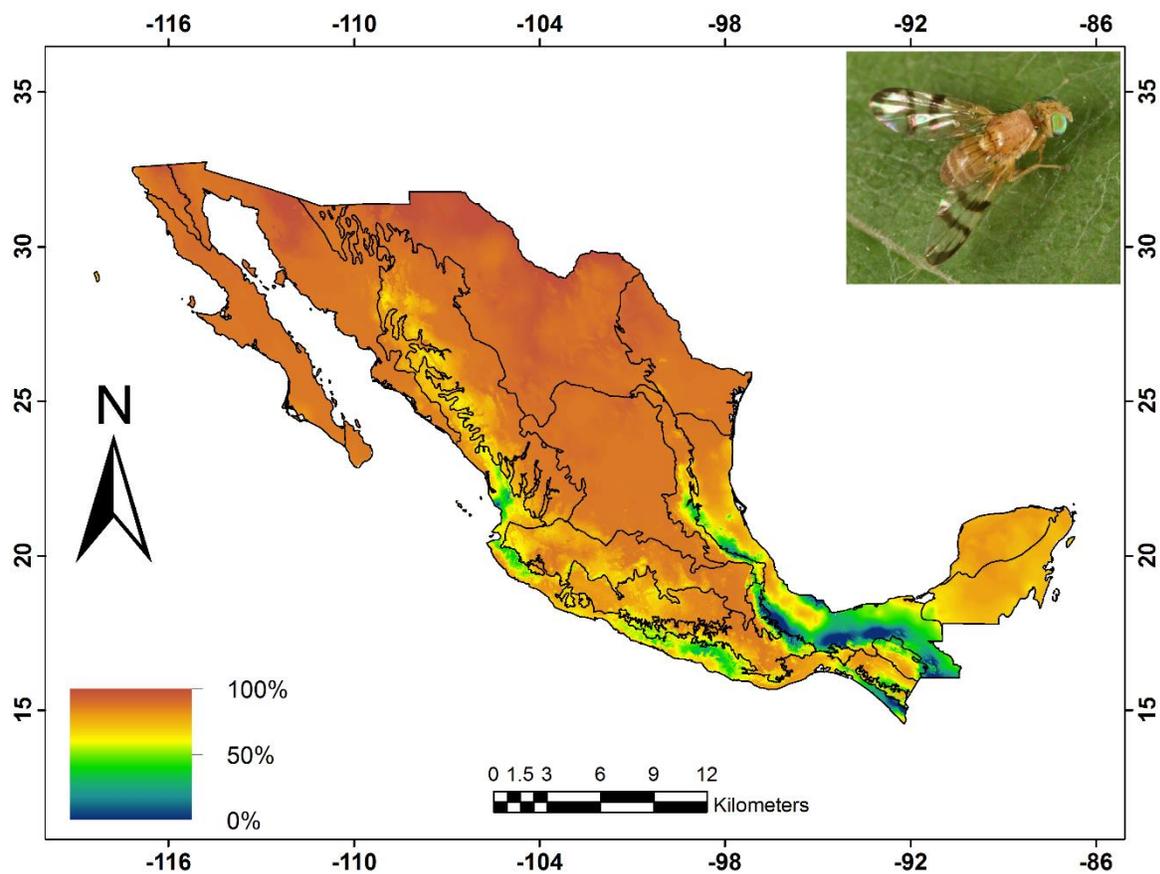


Figura 12. Nicho ecológico potencial de *Rhagoletis juglandis* en México. Escala: High= 100% (Presencia), - Presencia media 50%, Low= 0 (Ausencia).

R. juglandis infesta la nuez de castilla, ésta se basa en una producción tradicional y se concentra en Chihuahua, Coahuila, Sonora, Durango, Nuevo León e Hidalgo (SIAP, 2017). De acuerdo con la Figura 12, *R. juglandis* tiene todas las condiciones óptimas para vivir en los estados mencionados. Por lo que productores y

comercializadores de la región están en riesgo por los problemas que podrían enfrentar por la posible invasión de este insecto.

El 20% de los puntos proyectados se registraron en el Norte de México, el resto son registros de presencias de Estados Unidos de América. En el mapa se observa claramente que no solo se cuenta con disponibilidad idónea para el norte si no para el resto de la república. Sitios donde se cultiva la nuez de castilla no han presentado registros de *R. juglandis* pero se predice ecológicamente que cuenta con un nicho favorable para las provincias productoras. Se recomienda tomar medidas preventivas y de manejo en las áreas de producción de nuez de castilla.

3.7 *Rhagoletis pomonella*

Las variables bioclimáticas que aportaron al desempeño del modelo inicial fueron Media del rango diario, Temporalidad de la temperatura, Precipitación anual y Precipitación del mes más cálido, en el cuadro 15 se muestra el porcentaje de contribución de cada una de las variables de importancia.

Cuadro 15. Variables bioclimáticas y su aportación al modelo de *R. pomonella*.

Variable	Aportación al modelo
Temporalidad de la temperatura	85.7 %
Precipitación del mes más cálido	7.5 %
Media del rango diario	5.3 %
Precipitación anual	1.5 %

De los escenarios modelados para este díptero se presentaron resultados disyuntivos y a pesar de eso las opciones de calibración “Linear” y “Product” fueron las más importantes en la mayoría de los resultados.

El modelo seleccionado, LP, fue seleccionado por los valores registrados de ROC parcial y menor parametrización (Cuadro 16).

Cuadro 16. Resumen de los valores estadísticos y réplicas de calibración de los modelos Maxent de *R. pomonella*.

Características* (features)	Valor AICc**	ROC parcial	Tasa de omisión	Número de parámetros
LP	791.84	0.002	NA	7
LQP	793.64	0.002	NA	8
QP	793.67	0	NA	8
LQ	800.26	0	NA	8
PTL	1120.71	0	NA	21
PT	1120.94	0	NA	21
QT	1123.44	0	NA	21
QPT	1320.75	0	NA	22
LQPT	1920.60	0	NA	23
LQ	2338.73	0	NA	4
LP	2341.87	0.002	NA	5
QP	2342.85	0	NA	6
LQP	2342.87	0	NA	6
QT	2355.87	0	NA	21
PTL	2363.45	0	NA	24
PT	2363.45	0	NA	24
LQT	2367.16	0	NA	24
LQPT	2368.43	0	NA	25
QPT	2368.43	0	NA	25
PH	2477.77	0	NA	40
QPH	2510.44	0	NA	43
LH	2511.90	0	NA	43

*L, Q, P, T, y H son *linear, quadratic, product, threshold, y hinge* features calibraciones de Maxent.

**AICc es el criterio de información de Akaike para un tamaño de muestra pequeño.

El nicho ecológico potencial de la mosca de la manzana proyectado por el mejor modelo Maxent, coincide con las ocurrencias registradas actuales en México Figura 13. El modelo predijo de forma máxima para zonas aisladas de las provincias biogeográficas del Eje Volcánico Transmexicano, Cuenca del Balsas, Costa del Pacífico mexicano, Sierra Madre Oriental. Media disponibilidad se predijo para el Altiplano Mexicano y Sierra Madre Oriental, Yucatán El modelo proyectó mínima disponibilidad para las provincias biogeográficas de Sonora, California, Veracruzana, California, Baja California, Tamaulipeca, zona norte del Altiplano.

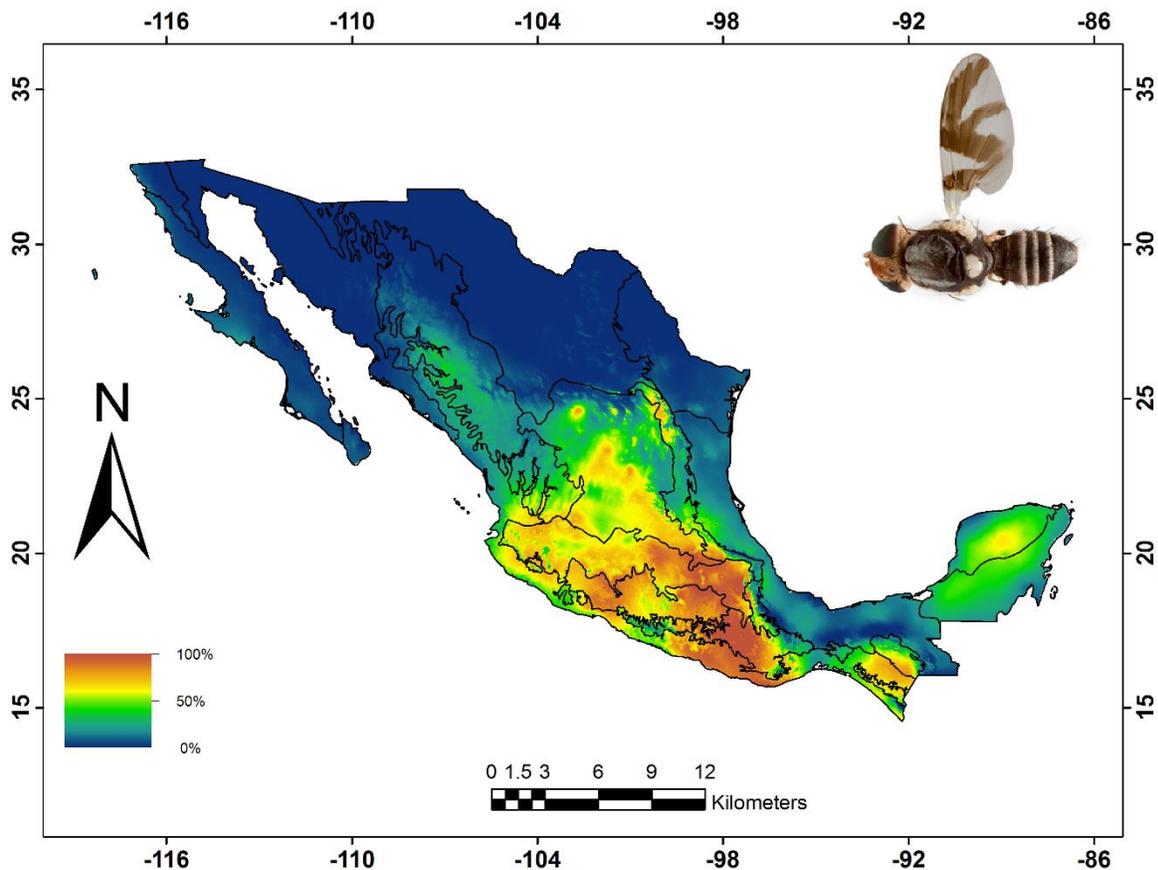


Figura 13. Nicho ecológico potencial de *Rhagoletis pomonella* en México. Escala: High= 100% (Presencia), - Presencia media 50%, Low= 0 (Ausencia).

México es el principal importador de manzana de Estados Unidos con 212 mil Toneladas anuales y una producción nacional de 716,930 toneladas en Aguascalientes, Chihuahua y Puebla. Estas 3 provincias coinciden con la disponibilidad ambiental máxima y adecuada de la mosca de la manzana.

3.8 *Rhagoletis suavis*

El modelo inicial de *R. suavis* fue determinado por las variables bioclimáticas: Rango anual de temperatura, Precipitación del mes más húmedo y Temperatura media del trimestre más cálido (Cuadro 17).

Cuadro 17. Variables bioclimáticas y su aportación al modelo de *R. suavis*.

Variable	Aportación al modelo
Precipitación del mes más cálido	82 %
Temperatura media del trimestre más cálido	17.3%
Rango anual de temperaturas	0.4 %
Precipitación del mes más húmedo	0.2%

Para el caso de esta mosca, después de analizar los resultados de las 22 réplicas, el modelo más significativo fue PL, con valor de AICc de 693.5097, ROC parcial de 0, una tasa de omisión de 1.0000 y 4 de parametrización (Cuadro 18).

Cuadro 18. Valores estadísticos y réplicas de calibración de los modelos Maxent de *R. suavis*.

Características* (features)	Valor AICc**	ROC parcial	Tasa de omisión	Número de parámetros
LQP	682.9111	0.726	1.0000	3
LQPT	682.9111	0.634	1.0000	3
QP	682.9111	0.772	1.0000	3
QPT	682.9111	0.62	1.0000	3
LQ	686.253	0.632	0.8889	4
TL	688.499	0.732	1.0000	2
PT	690.5454	0.632	1.0000	3
PL	693.5097	0	1.0000	4
HLP	695.5828	0	1.0000	9
PH	695.5828	0.748	1.0000	9
PTH	695.5828	0.55	1.0000	9
LQPH	695.6	0.718	1.0000	9
LQPTH	695.6	0.574	1.0000	9
QPTH	695.6	0.598	1.0000	9
TH	695.7192	0.626	1.0000	9
HL	702.1225	0.714	1.0000	10
THL	702.1225	0	1.0000	10
HLQ	731.6097	0	1.0000	13
QH	731.6097	0.71	1.0000	13
QTH	731.6097	0	1.0000	13
THLQ	731.6097	0.608	1.0000	13
THQ	731.6097	0	1.0000	13

*L, Q, P, T, y H son *linear*, *quadratic*, *product*, *threshold*, y *hinge* features calibraciones de Maxent.

**AICc es el criterio de información de Akaike para un tamaño de muestra pequeño.

Para *R. suavis* el modelo de disponibilidad ambiental delimitó la predicción de las condiciones adecuadas para la especie a gran parte del noroeste del país, en las provincias biogeográficas: California, Baja California, Sierra Madre Occidental, Altiplano Mexicano (Norte y Sur), Eje Volcánico Transmexicano y la zona biogeográfica Tamaulipeca (Figura 14).

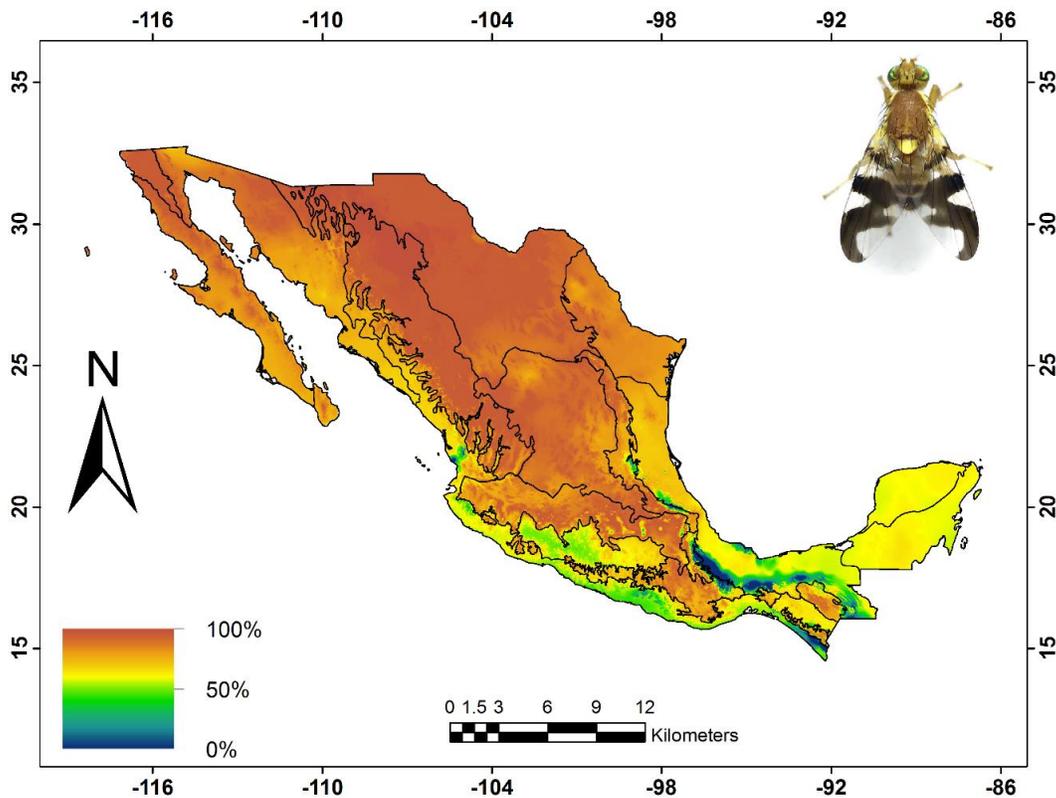


Figura 14. Nicho ecológico potencial de *Rhagoletis suavis* en México. Escala: High= 100% (Presencia), - Presencia media 50%, Low= 0 (Ausencia).

Áreas de disponibilidad ambiental media fueron calculadas en la Veracruzana, la Cuenca del Balsas, Chiapas, Yucatán y Sierra Madre del Sur. Mínima disponibilidad fue proyectada en el sur de la Costa del Pacífico Mexicano. Ninguna disponibilidad ambiental fue proyectada para los límites de las provincias biogeográficas de Sierra Madre del Sur y Veracruzana (Figura 14).

R. suavis es una mosca de la fruta exótica según las especificaciones de la NOM-076-FITO-1999 y vive en asociación con plantas del género *Juglans* (*Juglandaceae*) (Bush, 1966) el cual es de alta importancia en la economía agroforestal. Principalmente *J. regia*, *J. nigra* y *J. cinérea* se han utilizado para la producción

comercial de frutos secos (nueces) y en términos forestales, para la producción de madera (Rodríguez *et al.*, 1989).

Este díptero junto con *R. juglandis*, *R. zoqui* y *R. completa* son especies plaga de nogales (Rull *et al.*, 2013, Bush 1966, Smith y Bush 2000). En México la producción de nuez se concentra en el norte del país en los estados de Chihuahua, Sonora y Coahuila, Aguascalientes, Tamaulipas, Durango y Nuevo León (SIAP, 2017).

En el centro de México en Hidalgo, Jalisco y San Luis Potosí. En el sur de México, Oaxaca ocupa un lugar dentro de los 19 estados productores de nuez en México (SIAP, 2017). Estos datos de producción coinciden con nuestro nicho ecológico potencial y las áreas biogeográficas donde se calcula disponibilidad ambiental para esta mosca.

Árboles del género *Juglans* no solo se encuentran en sistemas de cultivo para producción de nuez. Forman parte de una vegetación secundaria en bosques subtropicales de México (Cedano, 2000) y ha sido reportado en Campeche, Chiapas, Colima, Durango, Guerrero, Hidalgo, Jalisco, México, Michoacán, Morelos, Nayarit, Oaxaca, Puebla, Quintana Roo, Sonora, Sinaloa, Tabasco, Tamaulipas, Veracruz, Yucatán (Pennington y Sarukhán, 2005), provincias donde según nuestro nicho ecológico potencial tiene disponibilidad ambiental *R. suavis* mosca, que vive en asociación con este árbol.

3.9 *Rhagoletis zoqui*

Las variables que mayor información aportaron al modelo de nicho ecológico potencial de esta especie, fueron, la Temperatura media anual, Isotermalidad, Estacionalidad de la temperatura, Temperatura media del trimestre más frío y Precipitación anual. En el Cuadro 19 se muestra su porcentaje de contribución.

De las 22 réplicas generadas con las cinco variables bioclimáticas elegidas, se obtuvieron en su mayoría valores de AICc mayores a 1322 y tasa de omisión de 0.6 a 0.9 (Cuadro 20). El modelo elegido (LQ) obtuvo valores más adecuados, con un AICc de 1249.014 y una tasa de omisión NA, un ROC parcial de 0 y parametrización de 7, como se muestra en el cuadro 20.

Cuadro 19. Variables bioclimáticas y su aportación al modelo de *R. zoqui*.

Variable	Aportación al modelo
Estacionalidad de la temperatura	65.9 %
Precipitación anual	16.2 %
Isotermalidad	9.9 %
Temperatura media del trimestre más frío	7.8 %
Temperatura máxima del mes más cálido	0.2%

Cuadro 20. Resumen de los valores estadísticos y réplicas de calibración de los modelos Maxent de *R. zoqui*.

Características* (features)	Valor AICc**	ROC parcial	Tasa de omisión	Número de parámetros
LQ	1249.014	0	0.06691729	7
QP	1270.476	0	0.08120301	9
QPT	1270.476	0	0.08120301	9
LQP	1272.815	0	0.08120301	10
LQPT	1272.815	0	0.08120301	10
PT	1283.458	0	0.06691729	7
PL	1283.664	0	0.06691729	7
PH	1300.697	0	0.09323308	25
PTH	1300.697	0	0.09323308	25
QH	1300.697	0	0.09323308	25
QPTH	1300.697	0	0.09323308	25
QTH	1300.697	0	0.09323308	25
TH	1300.697	0	0.09323308	25
THQ	1300.697	0	0.09323308	25
HLP	1303.456	0.588	0.09323308	26
TL	1319.193	0	0.09548872	4
HLQ	1322.892	0	0.09323308	24
THLQ	1322.892	0	0.09323308	24
HL	1323.984	0.532	0.09323308	27
THL	1323.984	0	0.09323308	27
LQPH	NA	0	0.09323308	31
LQPTH	NA	0	0.09323308	31

*L, Q, P, T, y H son *linear, quadratic, product, threshold, y hinge* features calibraciones de Maxent.

**AICc es el criterio de información de Akaike para un tamaño de muestra pequeño.

La mayor disponibilidad ambiental de *R. zoqui* ocurre en el centro del país. El área de mayor disponibilidad ambiental abarca las provincias biogeográficas Eje Volcánico Transmexicano, zonas aisladas de la Sierra Madre del Occidental y sur del Altiplano Mexicano (Figura 15).

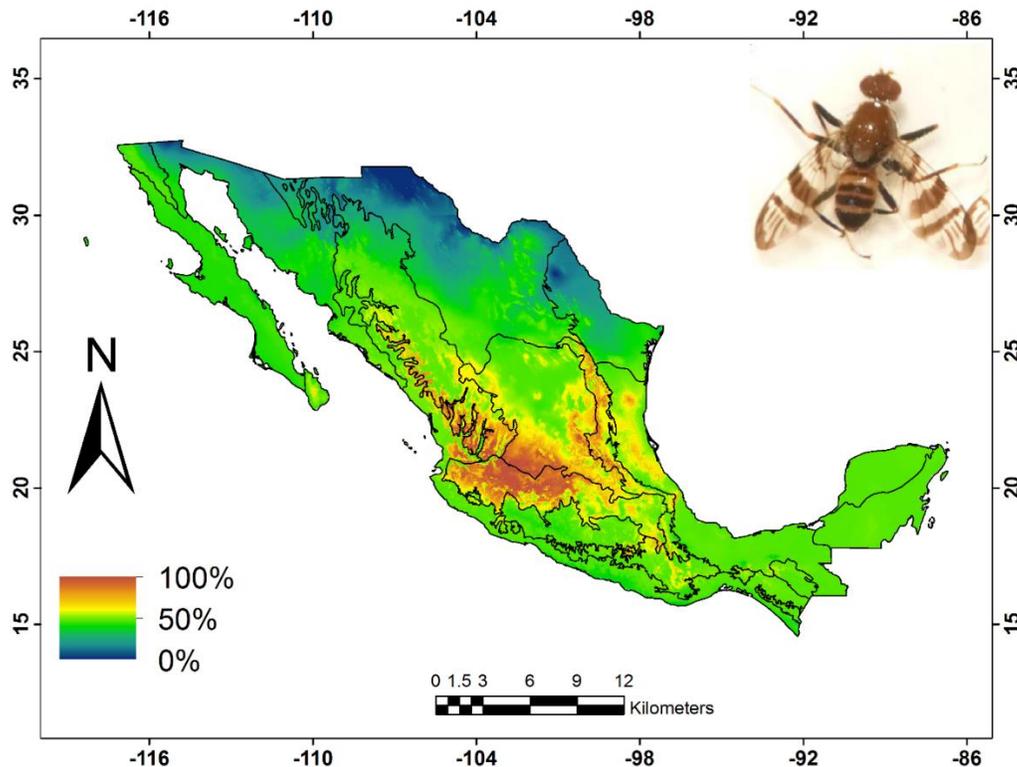


Figura 15. Nicho ecológico potencial de *Rhagoletis zoqui* en México. Escala: High= 100% (Presencia), - Presencia media 50%, Low= 0 (Ausencia).

Las áreas de disponibilidad media fueron calculadas a lo largo del territorio mexicano, exceptuando norte de las zonas Tamaulipeca, Altiplano mexicano y Sonora con una nula disponibilidad como se muestra en las zonas de color azul en el mapa de la figura 15.

El nicho ecológico potencial de *R. zoqui* coincide con lo reportado por Hernández-Ortiz, (1985) y Moral *et al.* (2015), donde mencionan que en la región montañosa de Hidalgo y Puebla (Eje Volcánico Transmexicano) *R. zoqui* es uno de los principales insectos que atacan al nogal de Castilla, siendo el nogal su principal hospedero. En México los estados de Tamaulipas, Jalisco, Puebla, Tlaxcala, Estado de México, Oaxaca y Querétaro son los principales productores de “nogal de Castilla” (*J. regia*)

(SAGARPA, 2011). El nicho ecológico proyectado coincide con los estados de Puebla, Tlaxcala, Estado de México, donde se observa que *R. zoqui* tiene disponibilidad ambiental.

Una de las regiones de mayor importancia económica en la producción de este fruto, es la Sierra Nevada de Puebla que abarca Estado de México, Morelos, Puebla y Tlaxcala, (estados donde el modelo de nicho ecológico potencial proyectado, muestra disponibilidad ambiental alta y media (Figura 15). Esta zona se caracteriza por ser productora de varios cultivos de frutales y diversos cultivos anuales y esto representa un ingreso adicional a la economía de los productores de la región (Mendoza-Robles *et al.*, 2010).

Para combatir esta especie, tradicionalmente se ha recurrido a las trampas con atrayentes, se utilizan en los programas de manejo integrado de plagas (MIP), teniendo especial uso en detección y monitoreo de adultos para ayudar a tomar decisiones sobre su control (Moral *et al.*, 2015). Con el conocimiento del posible nicho ecológico potencial de la especie y donde tendrá potencial de invasión se puede colaborar con el monitoreo y manejo integrado de plagas.

Y se propone que este tipo de metodologías (modelos de nicho ecológico) funcionen como una herramienta para conocer la posible disponibilidad ambiental de la especie, en relación a sus necesidades climatológicas y en las proyecciones geográficas poder interaccionar a los insectos plaga con sus principales hospederos de carácter económico.

4. CONCLUSIONES

1. Los mapas de nicho ecológico potencial de la especie, indican la posibilidad de expansión del género *Rhagoletis* spp. por todo el país, la información generada, confirma la existencia de especies con adaptaciones a condiciones principalmente neárticas.
2. Las provincias biogeográficas donde presentaron un mejor nicho ecológico potencial son Altiplano Mexicano, Sierra Madre Occidental, Eje volcánico Transmexicano.
3. Las variables ambientales que mayor influencia tuvieron en definir el nicho ecológico potencial de las especies de *Rhagoletis* spp. estudiadas, fueron: Isotermalidad (BIO3), presente en todos los modelos y Temporalidad de la temperatura (BIO4); medianamente importantes fueron; Media del rango diurno (BIO2), Rango de temperatura anual (BIO7), Temperatura media del cuartil más frío (BIO11), Precipitación anual (BIO12), Precipitación del mes más cálido (BIO14) y precipitación del cuartil más seco. Poca influencia mostró; Temperatura media anual (BIO1), Temperatura máxima del mes más cálido (BIO 5), Temperatura mínima del mes más frío (BIO6), Temperatura media del cuartil más cálido (BIO10) y temperatura media del cuartil más frío (BIO11).
4. La disponibilidad ambiental de estos insectos tefritidos coincide con los datos reportados de sus hospederos.
5. La importancia en esta tesis de proyectar mapas de idoneidad de plagas potenciales para el país como lo son especies del genero *Rhagoletis*, es que los resultados obtenidos pueden ser utilizados para hacer un comercio internacional científicamente informado con decisiones y negociaciones por parte de los responsables de las políticas de importación y exportación.

5. LITERATURA CITADA

- Aluja SM. 1993. Manejo Integrado de Moscas de la Fruta. Editorial Trillas. México, D. F., 251 pp.
- Anderson RP. 2003. Real vs. artefactual absences in species distributions: tests for *Oryzomys albigularis* (Rodentia: Muridae) in Venezuela. *Journal of Biogeography* 30: 591-605.
- Anderson RP, Martínez-Meyer E. 2004. Modeling species geographic distribution for preliminary conservation assessments: an implementation with the spiny pocket mice (*Heteromys*) of Ecuador. *Biological Conservation* 116: 167-179.
- Anónimo. 2017. European cherry fruit fly confirmed in Niagara County, New York. <https://fruitgrowersnews.com/news/european-cherry-fruit-flyconfirmed-niagara-county-new-york/> (accessed 2 agosto 2018).
- Barve V, Jiménez-Valverde A, Lira Noriega A, Maher SP, Peterson AT, Soberón J, Villalobos F. 2011. The crucial role of the accessible area in ecological niche modeling and species distribution modeling. *Ecological Modelling* 222: 1810–1819.
- Beaumont LJ, Hughes L, Poulsen M. 2005. Predicting species distributions: use of climatic parameters in BIOCLIM and its impact on predictions of species' current and future distributions. *Ecological Modelling* 186: 250-269.
- Begon M, Townsend CR, Harper JL. 2006. *Ecology: From individuals to Ecosystems*. 4^o Ed. Blackwell Publishing. The University of Liverpool, UK.
- Bush GL. 1966. The taxonomy, cytology and evolution of the genus *Rhagoletis* in North America (Diptera: Tephritidae). *Bulletin of the Museum of Comparative Zoology* 134 (11): 431-562.
- Burnham KP, Anderson DR. 2003. *Model selection and multimodel inference: a practical information-theoretic approach*. Springer Science & Business Media. Colorado, USA. 485 pp
- Busby J. 1991. BIOCLIM-a bioclimate analysis and prediction system. *Plant protection quarterly* Melbourne, Australia. 68 pp

- Cedano M. 2000. La familia *Cochlospermaceae* en el estado de Jalisco, México. Colección Flora de Jalisco. Instituto de Botánica. Universidad de Guadalajara. Jalisco, México.
- Canadian Food Inspection Agency CFIA. 2017. *Rhagoletis cerasi* (European Cherry Fruit Fly) - fact sheet [http:// www.inspection.gc.ca/plants/plant-pests/invasive-species/insects/european-cherry-fruit](http://www.inspection.gc.ca/plants/plant-pests/invasive-species/insects/european-cherry-fruit) (accessed 27 July 2018).
- Christenson LD, Foote RH. 1960. Biology of fruit flies. Annual Review of Entomology 5: 171-192.
- Daniel C, Grunder J. 2012. Integrated management of European cherry fruit fly *Rhagoletis cerasi* (L.): Situation in Switzerland and Europe. Insects 3(4): 956-988.
- Elton C. 1927. Animal ecology. Sidgwick and Jackson, London, England.
- Foote RH. 1966. Family Tephritidae. In a catalogue of the Diptera of the Americas south of the United States. Editorial São Paulo, Departamento de Zoologia, Secretaria da Agricultura do Estado de São Paulo, pp 91.
- Foote RH. 1981. The genus *Rhagoletis* Loew south of the United States (Diptera: Tephritidae). United States Department of Agriculture. Technical Bulletin United States Department of Agriculture 1600: 1-75.
- Fresnedo-Ramírez J, Segura S, Muratalla-Lúa A. 2011. Morphovariability of capulín (*Prunus serotina* Ehrh.) in the central-western region of Mexico from a plant genetic resources perspective. Genetic Resources and Crop Evolution 58(4): 481-495.
- Frías LD, Northland I, Capetillo J. 1991. Aspectos de la biología de *Rhagoletis tomatitis* Foote (Diptera: Tephritidae) en poblaciones de la II Región de Chile. Acta Entomológica Chilena 16: 193-200.
- Frías LD. 2001. Diferencias genéticas y morfológicas de los estados inmaduros de dos razas de *Rhagoletis conversa* (Bréthes) (Diptera: Tephritidae) asociadas a plantas *Solanum*: Distribución geográfica y posible origen en simpatria de una nueva especie. Revista Chilena de Historia Natural 74: 73-90.

- Grinnell J. 1917. The niche-relations of the California Thrasher. *Auk* 34:427-433.
- Guisan A, Zimmermann N. 2000. Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling* 135: 147–186.
- Hammer O, Harper DAT, Ryan PD. 2001. Past: Paleontological Statistics software package for education and data. *Paleontología Electrónica* 4(1): 9.
- Hernández-Ortiz V. 1985. Descripción de una nueva especie mexicana del género *Rhagoletis* Loew (Diptera: Tephritidae). *Folia Entomológica Mexicana* 64: 73–79.
- Hernández-Ortiz V, Frías LD. 1999. A revision of the *striatella* group of the genus *Rhagoletis* (Diptera: Tephritidae). *Insecta Mundi* 13: 11-20.
- Hernández-Ortiz V, Morales I, Vergara C. 2004. Detección de poblaciones de *Rhagoletis pomonella* (Diptera: Tephritidae) durante la fructificación de *Crataegus mexicana* (Rosaceae) en Puebla, México. *Acta Zoológica Mexicana* 20: 119-129.
- Hijmans RJ, Cameron SE, Parra JL, Jones PG, Jarvis A. 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 25: 1965-1978.
- Hood G, Wee Y, Goughnour R, Sim S, Egan S, Arcella T, Saint-Jean G, Powell T, Xu C, Feder J. 2013. The geographic distribution of *Rhagoletis pomonella* (Diptera: Tephritidae) in the Western United States: Introduced species or native population? *Annals of the Entomological Society of America* 106(1): 59-65.
- Hutchinson GE. 1957. "Concluding remarks". *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology* 22 (2): 415–427.
- Isabirye BE, Masembe C, Akol AM, Muyinza H, Rwomushana I, Nankinga CK. 2015. Modeling the potential geographical distribution and ecological niche of selected fruit fly (Diptera: Tephritidae) species in Uganda. *Journal of Plant and Pest Science* 2: 18–33.
- Johnson JB, Omland KS. 2004. Model selection in ecology and evolution. *Trends in Ecology and Evolution* 19(2): 101-108.

- Kriticos DJ, Sutherst RW, Brown JR, Adkins SW, Maywald GF. 2003. Climate change and the potential distribution of an invasive alien plant: *Acacia nilotica* ssp *indica* in Australia. *Journal of Applied Ecology* 40: 111–124.
- Kumar S, Neven LG, and Yee WL. 2014. Assessing the potential for establishment of western cherry fruit fly (*Rhagoletis indifferens*) using ecological niche modeling. *Journal of Economic Entomology* 107: 1032–1044.
- Kumar S, Yee, WL, Neven LG. 2016. Mapping global potential risk of establishment of *Rhagoletis pomonella* (Diptera: *Tephritidae*) using MaxEnt and CLIMEX niche models. *Journal of Economic Entomology* 109(5): 2043-2053.
- López-Martínez V, Pérez-De-la-O NB, Ramírez-Bustos II, Jiménez-García D. 2016. Current and potential distribution of the cactus weevil, *Cactophagus spinolae* (Coleoptera: Curculionidae), in Mexico. *Coleopterists Bulletin* 70: 327–334.
- Luna A, López-Martínez V, Pérez-De la O NB, Jiménez-García D, Jones R, Castañeda-Vildoza Á, Ruiz-Montiel C. 2017. Actual and potential distribution of five avocado regulated pests across Mexico, using the maximum entropy algorithm. *Florida Entomologist* 100(1): 92-100
- Manos PS, Stone DE. 2001. Evolution, phylogeny, and systematics of the Juglandaceae. *Annals of the Missouri Botanical Garden* 88(2): 231-269.
- Martínez M, Vargas-Ponce O, Rodríguez A, Chiang F, Ocegueda S. 2017. *Solanaceae* family in Mexico. *Botanical Sciences* 95(1): 131-145.
- Mendoza-Robles R, Parra-Inzunza F, Ríos-Carmenado I. 2010. La actividad frutícola en tres municipios de la Sierra Nevada en Puebla: Características, organizaciones y estrategia de valorización para su desarrollo. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo* 7(3): 229-245.
- Merow C, Smith MJ, Silander JA. 2013. A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: what it does, and why inputs and settings matter. *Ecography* 36(10): 1058-1069.
- Michel AP, Rull J, Aluja M, Feder JL. 2007. The genetic structure of hawthorn-infesting *Rhagoletis pomonella* populations in Mexico: Implications for sympatric host race information. *Molecular Ecology* 16: 2867-2878.

- Moral YMAD, Peña AHDL, Dzul-Cauich JF, Hernández-Ortiz V. 2015. Fluctuación poblacional de adultos de *Rhagoletis zoqui* en nogal de Castilla (*Juglans regia* L.) en Puebla, México. *Southwestern Entomologist* 40(2): 409-418.
- Morrone JJ, Roig-Juñent S, Crisci JV. 1994. Cladistic biogeography of terrestrial Subantarctic beetles (Insecta: Coleoptera) from southern South America. *National Geographic Research & Exploration* 10(1): 104-115.
- Morrone JJ, Katinas L, Crisci JV. 1997. A cladistic biogeographic analysis of Central Chile. *Journal of Computational Biology* 2(1): 25-41.
- Morrone JJ. 2014. Biogeographical regionalisation of the Neotropical region. *Zootaxa* 3782: 1-110.
- Muñiz-Reyes E, Guzmán-Franco AW, Sánchez-Escudero J, Nieto-Angel R. 2014. Occurrence of entomopathogenic fungi en tejocote (*Crataegus mexicana*) orchard soils and their pathogenicity against *Rhagoletis pomonella*. *Journal of Applied Microbiology* 117: 1450-1462.
- Nieto-Angel R, Hernández-Pigmeo F, Tovar-Pedraza J, Betancourt-Olvera M, Pinto VM, Leyva-Mir SG, Alonso-Hernández L, Muñiz-Merino M, Muñiz-Reyes E, Santiago-Felipe E, Humberto NE. 2016. Evaluación de trampas y atrayentes para el monitoreo de *Rhagoletis pomonella* en tejocote (*Crataegus mexicana*) en México. *Southwestern Entomologist* 41(2): 561-566.
- Odum EP, Warrett GW. 2006. *Fundamentos de ecología*. Editorial Thomson, D.F. México.
- Olson DM, Dinerstein E, Wikramanayake ED, Burgess ND, Powell GVN, Underwood EC, D'Amico JA, Itoua I, Strand HE, Morrison JC, Loucks CJ, Allnutt TF, Ricketts TH, Kura Y, Lamoreux JF, Wettengel WW, Hedao P, Kassem KR. 2001. Terrestrial ecoregions of the world: A new map of life on earth (ver.2). *BioScience* 51: 933-938.
- Osorio-Olvera L. 2018. Niche Toolbox. <http://shiny.conabio.gob.mx:3838/nichetoolb2/>. Consultado mayo-junio 2018.
- Pearson RG. 2007. Species distribution modeling for conservation educators and practitioners. *Synthesis. Lessons in Conservation* 3:54-89

- Pearson RG, Dawson TP, Lin YC. 2004. Modelling species distributions in Britain: and hierarchical integration of climate and land-cover data. *Ecography* 27: 285-298.
- Pennington TD, Sarukhán J. 2005. Árboles Tropicales de México. Tercera edición. Universidad Nacional Autónoma de México, Fondo de Cultura Económica, D.F. México.
- Pérez-De La O NB, López-Martínez V, Jiménez-García D, Campos-Figueroa M. 2016. Predicción de la disponibilidad ambiental de *Bulia schausi* (Lepidoptera: Noctuidae), una plaga potencial de brócoli en México. *Society of Southwestern Entomologists* 41: 163–169.
- Peterson AT. 2001. Predicting species' geographic distributions based on ecological niche modeling. *Condor* 103: 599-605.
- Peterson AT, Soberón J, Sánchez-Cordero V. 1999. Conservation of ecological niches in evolutionary time. *Science* 285:1265-1267.
- Peterson AT, Ball LG, Cohoon KC. 2002. Predicting distributions of tropical birds. *Ibis*, 144: e27-e32.
- Peterson AT, Papeş M, Soberón J. 2008. Rethinking receiver operating characteristic analysis applications in ecological niche modeling. *Ecological Modelling* 213: 63–72.
- Phillips SJ, Anderson RP, Schapire RE. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling* 190:231-259.
- Ramírez CC, Salazar M, Palma RE, Cordero C, Meza-Basso L. 2008. Phylogeographical analysis of neotropical *Rhagoletis* (Diptera: Tephritidae): did the Andes uplift contribute to current morphological differences?. *Neotropical Entomology* 37(6): 651-661.
- RStudio 0.99.902 (RStudio 2018). RStudio: Integrated Development for R. RStudio, Inc., Boston, MA Disponible: URL: <https://www.rstudio.com/products/rstudio/download/#download> [Acceso gratuito: marzo 14, 2018].
- Rodriguez R, Revilla A, Albuerne M, Perez C. 1989. Walnut (*Juglans spp.*). In *Trees II*. Springer Berlin, Heidelberg (pp. 99-126).

- Rull J, Aluja MS, Feder J, Berlocher S. 2006. Distribution and host range of hawthorn-infesting *Rhagoletis* (Diptera: Tephritidae) in México. *Annals of the Entomological Society of America* 99: 662–672.
- Rull J, Aluja MS, Feder JL. 2011. Distribution and basic biology of black cherry infesting *Rhagoletis* (Diptera: Tephritidae) in México. *Annals of the Entomological Society of America* 104: 202–211.
- Rull J, Aluja M, Tadeo Hernandez RE, Guillén L, Egan SP, Glover M, Feder JL. 2013. Distribution, host plant affiliation, phenology, and phylogeny of walnut-infesting *Rhagoletis* flies (Diptera: Tephritidae) in Mexico. *Biological Journal of the Linnean Society* 110: 765-779.
- Rzedowski J. 1993. Diversity and origins of the Phanerogamic Flora of Mexico. In: Ramamoorthy TP, Bye R, Lot A, Fa J. *Biological Diversity of Mexico, Origins and Distribution*. New York: Oxford University Press 129-144.
- Sarukhán J, Koleff P, Carabias J, Soberon J, Dirzo R, Llorente-Bousquets J, Halffter G, González R, March I, Mohar A, Anta S, de la Maza J. 2009. *Capital natural de México. Síntesis: Conocimiento actual, evaluación y perspectivas de sustentabilidad*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México. 100 pp.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). 2017. Cierre de la producción agrícola por estado. <http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-cultivo>. Access 2017-2018.
- Skevington JH, Dang PT. 2002. Exploring the diversity of flies (Diptera). *Biodiversity* 3: 1-27.
- Soberón J. 2007. Grinnellian and Eltonian niches and geographic distributions of species. *Ecology Letters* 10(12):1115–1123.
- Soberón J, Peterson AT. 2005. Interpretation of models of fundamental Ecological niches and species distributional areas. *Biodiversity Informatics* 2: 1–10.
- Soberón J, Nakamura M. 2009. Niches and distributional areas: Concepts, methods and assumptions. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106(2):19644-19650.

- Smith JJ, Bush GL. 2000. Phylogeny of the subtribe *Carpomyina* (Trypetinae), emphasizing relationships of the genus *Rhagoletis*. pp. 187–217. En Fruit flies (Tephritidae): phylogeny and evolution of behavior [eds. M. Aluja and A. L. Norrbom] CRC Press, Boca Raton, USA.
- Smith JJ, Gavrilovic V, Smitley DR. 2001. Native *Vaccinium* spp. and *Gaylussacia* spp. infested by *Rhagoletis mendax* (Diptera: Tephritidae) in the Great Lakes Region: a potential source of inoculum for infestation of cultivated blueberries. *Economic Entomology* 94: 1378–1385.
- Stockwell D. 1999. The GARP modelling system: problems and solutions to automated spatial prediction. *International Journal of Geographical Information Science* 13(2): 143-158.
- Tadeo E, Feder JL, Egan SP, Schuler H, Aluja M, & Rull J. 2015. Divergence and evolution of reproductive barriers among three allopatric populations of *Rhagoletis cingulata* across eastern North America and Mexico. *Entomologia Experimentalis et Applicata* 156(3): 301-311.
- Tewodros TW, Wee LY, Lisa GN. 2018. Assessing the risk of establishment of *Rhagoletis cerasi* (Diptera: Tephritidae) in the United States and Globally. *Journal of Economic Entomology* 111(3): 1275-1284.
- Tsoar A, Allouche O, Steinitz O, Rotem D, Kadmon R. 2007. A comparative evaluation of presence-only methods for modelling species distribution. *Diversity and Distributions* 13: 397-405.
- USDA-APHIS. 2017. APHIS restricts the entry of European cherry fruit fly (*Rhagoletis cerasi*) host commodities from Canada into the United States Federal order. DA-2017-15. (https://www.aphis.usda.gov/import_export/plants/plant_imports/federal_order/downloads/2017/DA-2017-15.pdf.) (accessed 23 September 2017).
- USDA-APHIS-PPQ. 2017. *Rhagoletis cerasi* (Linnaeus) European cherry fruit fly. https://www.aphis.usda.gov/plant_health/plant_pest_info/fruit_flies/downloads/rhagoletis-cerasi-report.pdf (accessed 25 September 2018).

- Villaseñor JL, Téllez-Valdés O. 2004. Distribución potencial de las especies del género *Jefea* (Asteraceae) en México. Anales del Instituto de Biología. Serie Botánica 75(2): 205-220.
- Vitaluña JR, Sandoval PDL, Tigrero JO. 2010. Manejo y control de moscas de la fruta. Quito, Ecuador.
http://biblioteca.espe.edu.ec/upload/Manejo_y_control_de_Moscas_de_la_fruta.pdf.
- Warren DL, Seifert SN. 2011. Ecological niche modeling in Maxent: the importance of model complexity and the performance of model selection criteria. Ecological Applications 21: 335–342.
- Warren DL, Glor RE, Turelli M. 2010. ENMtools: A toolbox for comparative studies of environmental niche models. Ecography 33: 607-611.
- White IM, Elson-Harris M. 1994. Fruit Flies of Economic Significance: Their Identification and Bionomics. CAB International. Oxon, UK. 601 pp.
- Yee WL, Goughnour RB. 2008. Host plant use by and new host records of apple maggot, western cherry fruit fly, and other *Rhagoletis* species (Diptera: Tephritidae) in western Washington state. Pan-Pacific Entomologist 84: 179–193.
- Yee WL, Hernandez-Ortiz V, Rull J, Sinclair BJ, Neven LG. 2014. Status of *Rhagoletis* (Diptera: Tephritidae) pests in the NAPPO countries. Journal Economic Entomology 107(1): 11-28.