

2013    Modelo de la dinámica poblacional de *Diaphorina citri* Kuwayama, vector de la enfermedad HLB de los cítricos    Juan Ángel Quijano Carranza



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería

Modelo de la dinámica poblacional de *Diaphorina citri*  
Kuwayama, vector de la enfermedad HLB de los cítricos

Tesis  
Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Doctor en

Ingeniería

Presenta  
Juan Ángel Quijano Carranza

Querétaro, Qro., Diciembre 2013



Universidad Autónoma de Querétaro  
 Facultad de Ingeniería  
 Especialidad/Maestría/Doctorado

Modelo de la dinámica poblacional de *Diaphorina citri* Kuwayama, vector de la enfermedad HLB de los cítricos

**TESIS**

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Doctor en Ingeniería

**Presenta:**

Juan Ángel Quijano Carranza

**Dirigido por:**

Dr. Irineo Torres Pacheco

**SINODALES**

Dr. Irineo Torres Pacheco  
 Presidente

Dr. J. Isabel López Arroyo  
 Secretario

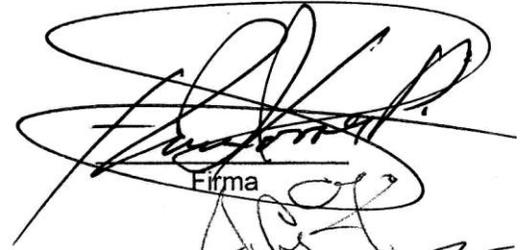
Dr. Ramón Gerardo Guevara González  
 Vocal

Dra. Rebeca del Rocío Peniche Vera  
 Suplente

Dr. Enrique Rico García  
 Suplente

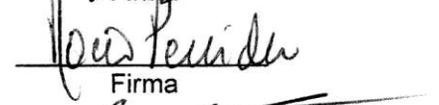
Dr. José Alfonso Aguirre Gómez  
 Suplente

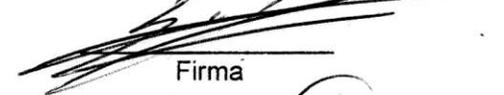
  
 Dr. Aurelio Domínguez González  
 Director de la Facultad

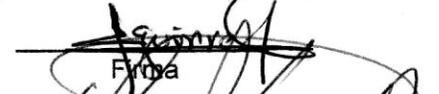
  
 Firma

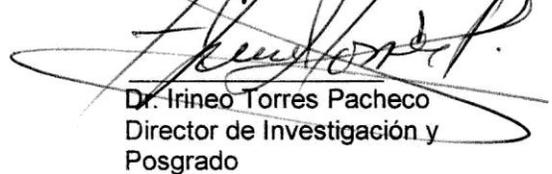
  
 Firma

  
 Firma

  
 Firma

  
 Firma

  
 Firma

  
 Dr. Irineo Torres Pacheco  
 Director de Investigación y  
 Posgrado

Centro Universitario  
 Querétaro, Qro.  
 Diciembre 19 de 2013  
 México

## RESUMEN

El Huanglongbing (HLB), la enfermedad causada por la bacteria *Candidatus Liberibacter asiaticus*, es la amenaza más importante para la prevalencia de la industria citrícola mexicana. Desde 2009, el patógeno ha sido detectado en 11 de los 23 estados productores de cítricos del país, aunque con una distribución limitada en cada estado. El psílido asiático de los cítricos (*Diaphorina citri* Kuwayama) (Hemiptera: Psyllidae) es el vector de la bacteria y actualmente se encuentra distribuido en todas las zonas productoras de cítricos del país. Hasta ahora la mayor afectación por esta enfermedad corresponde a la zona comercial de producción de limón mexicano en los estados de Colima, Jalisco, Michoacán, Nayarit y Sinaloa en la costa del Océano Pacífico. Una de las estrategias que se han implementado para la contención de esta enfermedad es el manejo regional de poblaciones del psílido. Para contribuir a la fundamentación técnica de esta estrategia, se desarrolló un modelo de la dinámica poblacional del psílido, el cual se alimenta con datos diarios de las variables climáticas temperatura y precipitación. El modelo estima los procesos de desarrollo y reproducción del insecto. Al comparar las estimaciones del modelo con datos observados se encontró una relación altamente significativa, lo cual indica que el modelo puede utilizarse de manera confiable. Con base en estos resultados se analizaron las series históricas diarias de temperatura y precipitación de todo el país y se clasificaron las zonas citrícolas con base en la probabilidad de presentar condiciones favorables para la reproducción continua y acelerada del psílido. Esta clasificación se llevó a cabo mediante estimaciones de la población total de Ninfas de *D. citri* utilizando el modelo y mediante el cálculo de índices agroclimáticos relacionados con la adaptación del psílido y los cítricos. Los resultados indican que una de las regiones más importantes de producción de naranja dulce en el país, la región norte de Veracruz, y la región sur del mismo estado, presentan el riesgo más alto para la reproducción acelerada del psílido y en consecuencia, para la presencia del HLB. Actualmente, estas regiones se encuentran libres del patógeno y se considera de la más alta prioridad intensificar el manejo de las poblaciones del psílido a fin de evitar el ingreso y establecimiento del HLB.

**Palabras clave:** Mapas de riesgo, modelaje dinámico, índices agroecológicos, dinámica poblacional, insectos vectores

## SUMMARY

Huanglongbing (HLB), the citrus disease caused by the bacteria *Candidatus Liberibacter asiaticus*, is the most important threat for the Mexican citrus industry. Since 2009, the pathogen has been detected in 11 out of 23 citrus producing states of the country although with a limited distribution in each state. The Asian citrus psyllid (*Diaphorina citri* Kuwayama [Hemiptera: Psyllidae]) is the vector of the bacteria; the insect is distributed in all the citrus growing zones of Mexico. Presently, the lime production zone in the Mexican states of Colima, Jalisco, Michoacán, Nayarit, and Sinaloa, near to the Pacific Ocean coast, is the most affected by this disease. One of the main strategies to stop the advance of HLB consists in the regional management of the psyllid populations. In order to contribute to the technical basis of this strategy, a dynamic population model of the psyllid was developed, which has as the main inputs daily data from the climatic variables temperature and rainfall. The model calculates the processes of development and reproduction of the insect. When comparing the estimations of the model with observed data a highly significant relation was found. This is indicative that the model can be used in a trustable manner. Based on these results the daily series of temperature and rainfall all over the country were analyzed to classify the citrus zones according to the probability of occurrence of favorable conditions for the fast and continuous psyllid reproduction. The analysis was performed utilizing the model to calculate the Nymphs populations and through the calculation of agro-ecological indices related with psyllid and citrus adaptation. The results indicate that one of the most important regions of sweet orange production of Mexico, the north of Veracruz, and the south of the same state represent the areas with the highest risk for an accelerated reproduction of the psyllid and in consequence for the presence of HLB. Nowadays, these regions remain free of the pathogen and it is considered of highest priority to intensify the management of the psyllid populations and prevent the entry and establishment of HLB.

**Key words:** Risk maps, dynamic modeling, agro-ecological indexes, population dynamics, insect vectors

## AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México por el apoyo, mediante beca para mis estudios de doctorado y por el financiamiento al proyecto del que se desprende este trabajo, denominado “Manejo de la enfermedad Huanglongbing (HLB) mediante el control de poblaciones del vector *Diaphorina citri* (Hemiptera: psyllidae), el psílido asiático de los cítricos (108591)”.

A la Universidad Autónoma de Querétaro, en particular a la Facultad de Ingeniería y al Cuerpo Académico de Ingeniería de Biosistemas por el apoyo brindado para realizar mis estudios de doctorado.

Al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), a través del Centro de Investigación Regional Centro y el Campo Experimental Bajío (CEBAJ), por las facilidades que me otorgaron para realizar el doctorado y para desarrollar este trabajo de investigación.

Al Dr. Irineo Torres Pacheco por animarme a ingresar al doctorado en ingeniería y por su apoyo y orientación durante el posgrado y como director de esta investigación.

Al Dr. J. Isabel López Arroyo por invitarme al proyecto nacional sobre el HLB y por sus importantes aportaciones al desarrollo de esta investigación como co-director de la misma.

Al Dr. Ramón Gerardo Guevara González por su excelente trato y apoyo en todas las cuestiones relacionadas con el posgrado y el desarrollo de esta investigación.

A la Dra. Rebeca del Rocío Peniche Vera por sus valiosas aportaciones a mi formación como doctor y su participación como asesora de esta investigación.

Al Dr. José Alfonso Aguirre Gómez por todo el apoyo que me brindó como compañero investigador del INIFAP y como asesor de esta investigación.

Al Dr. Enrique Rico García por su atenta disposición para apoyar en todo lo relacionado con el doctorado y con el desarrollo de esta investigación.

# INDICE

Núm.	Tema	Página
	Resumen	i
	Summary	ii
	Agradecimientos	iii
	Índice	iv
	Índice de cuadros	vi
	Índice de figuras	vii
<b>I.</b>	<b>INTRODUCCION</b>	<b>1</b>
<b>II.</b>	<b>REVISION DE LITERATURA</b>	<b>4</b>
2.1	Situación actual del HLB y su vector <i>Diaphorina citri</i> Kuwayama.	4
2.2.	Impactos Potenciales del HLB en la citricultura mexicana.	6
2.3	Biología y hábitos del psílido asiático de los cítricos <i>D. citri</i>	8
2.4	Factores ambientales y el desarrollo de los insectos	10
2.5	Avances en el desarrollo y aplicación de modelos de pronóstico al manejo de problemas fitosanitarios	12
2.6	Enfoque de modelación dinámica	13
<b>III.</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>16</b>
3.1	Caracterización de los requerimientos térmicos de los diferentes estadios de <i>D.</i> <i>citri</i>	16
3.2	Construcción y pruebas de ajuste del Modelo de dinámica poblacional de <i>D. citri</i>	18
3.3	Estimación de la distribución potencial de <i>D. citri</i> en México	25
3.3.1	Cálculo de índices agroclimáticos	25
3.3.2	Estimación de la población de <i>D. citri</i> utilizando el modelo de dinámica poblacional	28
<b>IV.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSION</b>	<b>31</b>
4.1	Verificación experimental de la temperatura base de desarrollo de <i>D. citri</i>	31
4.2	Pruebas de ajuste del modelo de	32

	simulación de <i>D. citri</i>	
4.3	Estimación del riesgo de dispersión y establecimiento de <i>D. citri</i> .	44
4.3.1	Cálculo de índices agroclimáticos	44
4.3.1.1	Índice de disponibilidad de Hospedante susceptible	45
4.3.1.2	Índice de condiciones favorables para el desarrollo de <i>D. citri</i>	48
4.3.2	Simulación de la dinámica poblacional de <i>D. citri</i>	51
4.3.3	Implicaciones para el Manejo de <i>D. citri</i> y el HLB	55
<b>V</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>57</b>
	<b>LITERATURA CITADA</b>	<b>58</b>
	<b>APÉNDICE</b>	<b>64</b>

## INDICE DE CUADROS

Cuadro		Página
2.1	Superficie sembrada, producción y valor de la producción de limón y naranja por entidad federativa en México	7
3.1	Listado de variables del modelo de dinámica poblacional de <i>D. citri</i> y su descripción	21
3.2	Listado de variables del módulo de fenología del cítrico y su descripción	23
3.3	Dinámicas observadas de brotes del cítrico y de los diferentes estadios de <i>D. citri</i> en dos localidades del estado de Colima en 2010.	24
4.1	Duración del desarrollo en días de <i>D. citri</i> desde Huevo hasta Adulto a diferentes temperaturas constantes	31
4.2	Dinámicas simuladas de brotes vegetativos del cítrico y de los diferentes estadios de <i>D. citri</i> en dos localidades del estado de Colima en 2010.	34
4.3	Estadísticas de la regresión entre los datos observados y simulados de Huevecillo de <i>D. citri</i>	39
4.4	Análisis de varianza para la regresión entre las ninfas observadas y simuladas de <i>D. citri</i> .	41
4.5	Análisis de varianza para la regresión entre los adultos observados y simulados de <i>D. citri</i> .	43
4.6	Estadísticas básicas de los resultados del comportamiento de los índices agroclimáticos relacionados con la distribución de <i>D. citri</i> .	44

## INDICE DE FIGURAS

Figura		Página
2.1	Adulto de <i>D. citri</i>	9
2.2	Relación entre la tasa de desarrollo de <i>D. citri</i> y la temperatura, de acuerdo con datos de la literatura	13
3.1	Cámaras de crecimiento utilizadas	17
3.2	Diagrama causal del modelo de dinámica poblacional de <i>D. citri</i>	19
3.3	Diagrama de flujo del modelo del ciclo de vida de <i>D. citri</i> .	20
3.4	Diagrama del flujo del módulo de fenología y brotación del cítrico.	22
3.5	Detecciones del HLB en México de Marzo de 2009 a Diciembre de 2011.	30
4.1	Modelo de regresión ajustado entre la tasa de desarrollo y la temperatura para <i>D. citri</i> .	32
4.2	Dinámica poblacional simulada de <i>D. citri</i> para la estación Gallo Verde en Veracruz en 2009.	33
4.3	Dinámicas observada y simulada de Huevecillos de <i>D. citri</i> para las localidades de Coquimatlán (a) e INIFAP-Tecomán (b), en Colima en 2010.	35
4.4	Modelos de regresión ajustados para los datos observados y simulados de brotes de cítrico en las localidades de Coquimatlán (a) e INIFAP-Tecomán (b), en Colima en 2010.	36
4.5	Dinámicas observada y simulada de Huevecillos de <i>D. citri</i> para las localidades de Coquimatlán (a) e INIFAP-Tecomán (b), en Colima en 2010.	37
4.6	Modelo de regresión ajustado entre los datos observados y simulados de Huevecillos de <i>D. citri</i> en dos localidades de Colima en 2010.	38
4.7	Dinámicas observada y simulada de Ninfas de <i>D. citri</i> para las localidades de Coquimatlán (a) e INIFAP-Tecomán (b), en Colima en 2010.	40
4.8	Modelo de regresión ajustado entre los datos observados y simulados de Ninfas de <i>D. citri</i> en dos localidades del estado de Colima.	41
4.9	Dinámicas observada y simulada de Adultos de <i>D. citri</i> para las localidades de Coquimatlán (a) e INIFAP-Tecomán (b), en Colima en 2010.	42
4.10	Modelo de regresión ajustado entre los datos observados y simulados de Adultos de <i>D. citri</i> en dos localidades del estado de Colima.	43
4.11	Índice de condiciones favorables de temperatura para	46

	el crecimiento de los cítricos.	
4.12	Índice de condiciones favorables de humedad para el crecimiento de los cítricos.	47
4.13	Índice de condiciones favorables de temperatura para el desarrollo de D. citri.	48
4.14	Índice de generaciones potenciales de D. citri como proporción del máximo obtenido.	49
4.15	Índice integrado de condiciones agroclimáticas favorables para la brotación de los cítricos y la reproducción de D. citri.	51
4.16	Dinámica poblacional simulada de D. citri en 5 localidades representativas de zonas citrícolas del país.	52
4.17	Dinámica poblacional simulada de D. citri en la localidad de Tamiahua, Veracruz en el período de 1991 a 1999.	53
4.18	Niveles estimados del potencial de crecimiento poblacional de D. citri en las diferentes regiones citrícolas del país.	54

## I. INTRODUCCION

Ante el aumento en la introducción de plagas exóticas, que ha resultado de la globalización y el incremento de los intercambios comerciales, la mayoría de las naciones han visto comprometida su tarea de salvaguardar su patrimonio agrícola por la amenaza de la introducción, establecimiento y dispersión de nuevas plagas y enfermedades. Cada vez es más evidente que el monitoreo físico y la inspección no son suficientes para prevenir la entrada de nuevos problemas fitosanitarios.

Los sistemas de vigilancia epidemiológica han venido incorporando más elementos de información sobre los diferentes factores asociados a los procesos de invasión de nuevas zonas agrícolas por organismos potencialmente dañinos para las plantas o la biodiversidad de esas regiones. De este modo la prevención fitosanitaria evalúa los riesgos considerando la biología y el comportamiento de las plagas, las condiciones meteorológicas y los factores de predisposición de los cultivos u hospedantes primarios. Esto ha permitido que los enfoques de evaluación del riesgo fitosanitario se basen cada vez más en elementos cuantitativos.

El manejo de numerosos componentes de información y la consideración de su evolución a través del tiempo ha puesto de manifiesto la necesidad de aplicar herramientas como el modelaje dinámico para representar la evolución y la interacción entre variables. Diversos autores han subrayado la importancia de los modelos matemáticos (Haefner, 2005; Thornley y France, 2007).

En la presente investigación se aborda un problema fitosanitario de importancia creciente en México, el amarillamiento de los cítricos, también conocido como Huanglongbing o HLB, el cual se asocia a la bacteria *Candidatus Liberibacter* y se encuentra en un proceso de dispersión a través de su vector, el Psílido Asiático de los Cítricos, *Diaphorina citri* Kuwayama. Actualmente el vector

se encuentra distribuido en todas las regiones cítricas del país, pero la enfermedad solamente en algunos estados.

La aparición de árboles de cítricos positivos a HLB en la península de Yucatán y en la costa de Nayarit y Jalisco representa la mayor amenaza que la citricultura nacional haya enfrentado, pues el hecho de que el principal vector de esta enfermedad esté presente en todo el país aumenta la probabilidad de que el contagio se extienda a todas las zonas cítricas de México. Esta invasión está provocando ya la pérdida de árboles de cítricos, un significativo incremento en los costos de producción para el control del psílido y un enorme esfuerzo humano y material por parte de la Dirección General de Sanidad Vegetal para detectar y contener al vector.

Ante la evidente dispersión y posible establecimiento de la enfermedad HLB de los cítricos en México, la estrategia nacional de contención de esta amenaza, carece de información oportuna para determinar:

- La dinámica poblacional del vector en las diferentes regiones del país.
- Los patrones de dispersión del vector
- La velocidad de transmisión o contagio de la enfermedad por la acción del psílido
- Las ventanas biológicas de oportunidad para el control de la población del vector.

Aunque se cuenta con elementos importantes como la descripción de la biología del insecto, la fenología de las diferentes especies de cítricos e información actualizada de las variables meteorológicas que afectan el comportamiento del hospedante y del vector, hace falta contar con un esquema que permita integrar todos estos elementos para estimar el efecto de las interacciones entre ellos e incorporar el pronóstico como un elemento clave en la planificación de la campaña nacional.

## 1.1. Hipótesis

La dinámica poblacional del psílido asiático de los cítricos, *Diaphorina citri* Kuwayama, depende de la interacción entre la población del psílido, la fenología del hospedante y el clima.

## 1.2. Objetivo General.

Desarrollar un modelo de pronóstico de la dinámica poblacional del psílido asiático de los cítricos *Diaphorina citri* Kuwayama en función de variables del clima, la población del vector y la fenología del hospedante.

### 1.2.1. Objetivos específicos.

- Verificar experimentalmente las temperaturas umbrales de desarrollo de los diferentes estadios del psílido asiático de los cítricos.
- Probar el ajuste del modelo construido comparando con datos de dinámicas del vector obtenidos por el proyecto nacional de HLB.
- Utilizar el modelo para delimitar las zonas de más alto riesgo para el establecimiento y dispersión del psílido asiático de los cítricos.

## II. REVISION DE LITERATURA

### 2.1. Situación actual del HLB y su vector *Diaphorina citri* Kuwayama.

Desde el inicio del presente siglo, el Continente Americano se encuentra bajo la invasión de una de las enfermedades más destructivas de los cítricos, el Huanglongbing (HLB o amarillamiento de los cítricos), el cual es causado por la bacteria limitada al floema *Candidatus Liberibacter asiaticus* (Da Graca, 1991; Da Graca & Korsten 2004). En el caso de México, esta enfermedad tiene una distribución limitada en el país y el Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (SENASICA), a través de la Dirección General de Sanidad Vegetal (DGSV) mantiene una alerta constante para tratar de mantener las zonas citrícolas más importantes del país libres del HLB (Trujillo-Arriaga et al., 2008). La seriedad de esta amenaza se incrementa por el hecho de que el principal vector de la enfermedad, el psílido asiático de los cítricos (*Diaphorina citri* Kuwayama) se encuentra distribuido en todas las regiones citrícolas del país (López-Arroyo et al., 2009; Trujillo-Arriaga, 2010).

El monitoreo de este problema se inició en México en 2008, al conocerse la presencia del HLB en Brasil y los Estados Unidos de América, muestreándose insectos y material vegetativo de cítricos. La bacteria *Candidatus Liberibacter asiaticus* fue detectada en 2009 en los municipios de Tizimin, Yucatán y Lázaro Cárdenas, Quintana Roo. Ese mismo año, la bacteria se detectó tanto en material vegetativo como en el psílido en los estados de Jalisco y Nayarit. En el 2010, el HLB se encontró en Campeche, Colima, y Sinaloa (Trujillo-Arriaga, 2010). Para finales del 2011, la bacteria había sido detectada en los estados de Baja California Sur, Michoacán, Chiapas e Hidalgo sumando un total de 11 estados con detecciones positivas (SENASICA 2012).

Hasta ahora, el limón mexicano (*Citrus aurantifolia* Swingle) es la especie más afectada por el HLB en México (Robles-González et al., 2011; Esquivel-Chávez et al., 2012), con más de 10,000 hectáreas of huertas comerciales

infectadas (SENASICA 2012). La superficie afectada se encuentra distribuida principalmente en los estados de Colima y Michoacán. En cuanto a la naranja dulce (*Citrus sinensis* L. Osbeck), la zona más importante de huertas comerciales se encuentra en un área agrícola cercana a la parte norte del Golfo de México, con 258, 546 hectáreas (77% del total) distribuidas en los estados de Veracruz, Tamaulipas, San Luis Potosí y Nuevo León (Servicio de Información Agropecuaria y Pesquera, SIAP, 2012). Los últimos reportes de las inspecciones en esos estados no han detectado la presencia de la bacteria (SENASICA 2012).

En México, *D. citri* ha sido reportado desde el 2002, comprobándose su presencia en todas las regiones citrícolas del país, con excepción de Baja California y el Norte de Sonora (López-Arroyo et al., 2009; Trujillo-Arriaga et al., 2008).

*D. citri* puede ocasionar daños significativos en forma directa, pues bajo condiciones de fuerte infestación puede matar los brotes vegetativos en desarrollo o causar la abscisión de las hojas (Michaud, 2004), aunque la mayor amenaza se relaciona con la transmisión de la enfermedad HLB.

Debido a lo relativamente reciente de la invasión de este insecto y a la consecuente falta de conocimiento sobre el mismo, se carece de tecnología integral específica para su control. Por lo anterior, el Gobierno Federal, a través del Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria, SENASICA ha encabezado, desde el 2009, una serie de apoyos para detectar y contener el avance de esta importante enfermedad. Como parte de este esfuerzo se ha aprobado un proyecto con financiamiento del Fondo Sectorial De Investigación En Materia Agrícola, Pecuaria, Acuicultura, Agrobiotecnología Y Recursos Fitogenéticos para efectuar los estudios para conocer la fenología del insecto, distribución y épocas de mayor incidencia de poblaciones y daños a los árboles, así como en otras especies de plantas hospedantes alternos.

Del mismo modo se pretende evaluar alternativas para su manejo, como el uso de bioinsecticidas y agentes de control biológico y establecer las bases para la realización del diagnóstico del patógeno en el país a través de técnicas moleculares. Asimismo, se ha considerado el desarrollo de alternativas para manejar la enfermedad o plantear estrategias de remediación para evitar pérdidas cuantiosas en la citricultura nacional. El desarrollo de un sistema de alerta epidemiológica se plantea como una importante base para el establecimiento planeado de estrategias de manejo de alcance nacional (López-Arroyo et al., 2009).

## **2.2. Impactos Potenciales del HLB en la citricultura mexicana.**

La citricultura en México representa una actividad de gran importancia dentro de la fruticultura nacional, al nivel internacional, nuestro país ocupa el quinto lugar mundial en producción de cítricos. La superficie establecida supera las 526 mil hectáreas, que producen un promedio anual de 6.7 millones de toneladas de fruta, con un valor estimado de 8,050 millones de pesos. De la superficie establecida, el 68.5% corresponde a naranja, 20.5% a limón mexicano, 5.2% a limón persa, y el resto a toronjas, mandarinas y tangerinas (Trujillo-Arriaga et al., 2008). En el Cuadro 2.1 se muestran la superficie sembrada, la producción y el valor de la misma para los principales estados productores de limón y naranja en México en 2012.

Cuadro 2.1 Superficie sembrada, producción y valor de la producción de limón y naranja en el año 2012 por entidad federativa en México.

LIMÓN (incluye la variedad mexicana y persa)				NARANJA DULCE			
ENTIDAD FEDERATIVA	Sup. Sembrada (Ha)	Producción (Ton)	Valor Producción (Miles de Pesos)	ENTIDAD FEDERATIVA	Sup. Sembrada (Ha)	Producción (Ton)	Valor Producción (Miles de Pesos)
VERACRUZ	40,058.97	558,130.40	1,484,803.83	VERACRUZ	166,255.00	1,789,224.37	2,481,152.98
MICHOACAN	42,941.30	475,567.69	1,053,406.29	TAMAULIPAS	33,022.50	522,572.77	1,314,866.09
COLIMA	19,953.50	354,705.14	765,389.26	SAN LUIS POTOSI	38,117.50	324,213.26	454,113.35
OAXACA	22,922.94	199,535.12	574,515.21	SONORA	6,947.00	142,985.32	292,130.33
GUERRERO	6,877.25	75,016.43	205,185.07	NUEVO LEON	25,445.98	204,749.85	289,066.66
TAMAULIPAS	4,301.79	43,817.48	168,315.75	PUEBLA	18,014.00	219,546.20	277,073.40
YUCATAN	5,234.63	126,923.52	160,281.28	YUCATAN	12,510.93	153,595.35	186,229.05
JALISCO	4,894.39	40,776.71	117,748.02	TABASCO	8,133.34	77,925.70	164,453.15
TABASCO	7,171.32	84,106.40	102,412.23	BAJA CALIFORNIA SUR	2,775.00	32,256.75	115,027.13
PUEBLA	2,253.90	27,739.55	63,746.55	OAXACA	4,767.49	56,800.25	98,272.63
QUINTANA ROO	1,232.50	12,189.92	53,643.00	HIDALGO	5,355.00	35,457.33	81,581.71
NAYARIT	2,420.50	19,402.81	42,895.13	CAMPECHE	2,956.50	26,455.60	68,688.46
CAMPECHE	1,288.00	6,532.02	23,017.89	QUINTANA ROO	2,147.00	21,337.40	45,100.61
SAN LUIS POTOSI	1,564.00	10,460.65	21,588.95	SINALOA	1,557.00	14,797.74	37,887.85
MORELOS	402.9	3,930.79	16,167.26	CHIAPAS	2,312.50	14,827.82	26,384.41
CHIAPAS	1,075.05	4,428.89	14,575.67	COLIMA	349.5	5,858.50	26,258.71
SINALOA	625	4,006.60	11,466.21	GUERRERO	491.45	4,397.53	15,287.28
SONORA	179	1,558.45	7,932.92	JALISCO	392.56	5,029.51	14,012.12
HIDALGO	374	2,335.30	6,300.71	MORELOS	197.8	4,640.72	10,293.34
DURANGO	250	760.9	4,470.83	BAJA CALIFORNIA	325.5	2,715.97	8,467.14
ZACATECAS	134	1,136.60	4,145.92	MICHOACAN	308.37	3,051.17	6,077.18
BAJA CALIFORNIA	158.5	1,057.60	3,020.15	QUERETARO	243	2,424.00	5,452.80
MEXICO	119	797.23	2,814.95	DURANGO	262	693.7	3,472.55
BAJA CALIFORNIA SUR	65	200.49	968.57	NAYARIT	118.85	790.47	1,382.34
AGUASCALIENTES	4	46.2	184.8	MEXICO	42	255.77	977.29
QUERETARO	13	41.1	73.98	ZACATECAS	24	172.6	381.51
GUANAJUATO	1.5	4.9	13.48	AGUASCALIENTES	2	14	32.2
<b>NACIONAL</b>	<b>166,515.94</b>	<b>2,055,208.89</b>	<b>4,909,083.90</b>	<b>NACIONAL</b>	<b>333,073.77</b>	<b>3,666,789.65</b>	<b>6,024,122.26</b>

FUENTE: SIAP, 2013 (www.siap.gob.mx)

Es muy importante monitorear y controlar las poblaciones de *D. citri*, ya que este insecto vector podría dispersar al HLB en las zonas productoras de cítricos del país, provocando la muerte prematura de árboles de naranja, mandarina, toronja y limón y afectando seriamente a la cadena citrícola nacional en los tres sectores, producción primaria, transformación y comercio.

En general, la estrategia recomendada para el manejo del HLB es la prevención, ya que una vez introducida la enfermedad, es sumamente difícil erradicarla, pues a la fecha no se ha encontrado una cura para los árboles enfermos (López-Arroyo et al., 2009). Como un plan alternativo se proponen acciones como la vigilancia fitosanitaria, el diagnóstico, la cuarentena, el manejo, el control de vectores y la remoción de árboles enfermos.

La campaña nacional de monitoreo de este importante vector se basa en un sistema de vigilancia basado en inspecciones de huertas y muestreo de psílidos para determinar por técnicas biotecnológicas la presencia del agente causal del HLB. Este gran esfuerzo de prospección requiere ser complementado con estimaciones del comportamiento del vector basadas en modelos que integren información del clima, el hospedante y el insecto.

### **2.3. Biología y hábitos del psílido asiático de los cítricos *D. citri***

Este insecto, perteneciente a la Orden Hemiptera, familia Homoptera, subfamilia Psyllidae, es una plaga confinada de las Rutáceas, encontrándose en hospedantes silvestres del género Citrus, especialmente Limones (*C. limon*) y Limas (*C. aurantiifolia*), aunque su hospedante preferido es una rutácea ornamental llamada Limonaria *Murraya paniculata* (López-Arroyo et al., 2009)

*D. citri* causa daño a la planta primariamente por la transmisión del patógeno *Candidatus Liberibacter* spp., una bacteria restringida al floema, causante del “Huanglongbing” antes “greening” (enverdecimiento), enfermedad que es considerada más devastadora que la tristeza de los cítricos (Graca y Korsten, 2008). Además, el insecto al alimentarse de la planta es capaz de provocar defoliación y muerte de ramas; causar daños severos en los puntos de crecimiento de las plantas (brotes), reducción en el tamaño de la fruta, desarrollo asimétrico, aborto de semilla y falta de jugo. Infestaciones altas de este insecto también originan abundantes secreciones de mielecilla que favorece la presencia y desarrollo del hongo de la fumagina, la cual afecta el vigor de los árboles al interferir el proceso de la fotosíntesis (Halbert y Manjunath, 2004).

El rango de huéspedes de *D. citri* está restringido a cítricos y especies cercanas de la familia Rutaceae. Dentro de los cítricos destacan el limón, la naranja, la lima, la toronja y la planta ornamental *Murraya paniculata* que es el huésped preferido. Los adultos de *D. citri* son saltadores activos; al alimentarse de las hojas o brotes, característicamente forman un ángulo de 30° respecto a la superficie de las hojas (Figura 2.1). Los huevos son amarillo brillante y son depositados en los brotes recién emergidos. Las ninfas son verdes o anaranjado opaco; se alimentan en hojas y tallos; sin embargo, es más probable encontrarlas en brotes nuevos por lo que frecuentemente se encuentran incrementos poblacionales durante los periodos de crecimiento activo de la planta (Halbert y Manjuntah, 2004). El psílido asiático al alimentarse en una planta infectada adquiere el patógeno en 30 min. (Rositacher, 1991). El patógeno se multiplica en el vector (Aubert, 1987). Los



Figura 2.1 Adulto de *D. citri*.

adultos y las ninfas de cuarto y quinto instar son capaces de transmitir el patógeno después de 8-12 días (Roistacher, 1991).

#### **2.4. Factores ambientales y el desarrollo de los insectos.**

Al igual que otros organismos vivos, los insectos son capaces de sobrevivir únicamente dentro de ciertos límites marcados por factores ambientales como la temperatura, la humedad relativa o el fotoperiodo. Dentro de este rango, estos factores influyen a su vez sobre el nivel de respuesta de comportamientos tales como la alimentación, la dispersión, la oviposición o el desarrollo (Wagner et al., 1984).

Uno de los factores ambientales que ejerce una mayor influencia en el desarrollo de los insectos es, sin duda, la temperatura. Ello es debido principalmente a que los insectos por ser organismos poiquiloterms, no pueden regular su temperatura (Wagner et al., 1984).

Algunos de los conceptos que se han desarrollado para relacionar la influencia de la temperatura sobre el desarrollo de insectos son:

La temperatura mínima umbral o temperatura base, que es la temperatura a la cual el desarrollo se detiene. A medida que la temperatura aumenta por encima de la temperatura base, el desarrollo se acelera hasta que se alcanza la temperatura óptima. La temperatura óptima es aquella a la cual el desarrollo ocurre lo más rápidamente posible (aquella en que la tasa de desarrollo es máxima). La temperatura máxima umbral es la temperatura por encima de la óptima a la que el desarrollo se detiene, ocurriendo generalmente la muerte del organismo (Marco, 2001).

La tasa de desarrollo, definida como la inversa del tiempo de desarrollo, mide la porción de desarrollo avanzada por unidad de tiempo, la curva resultante

tiene forma sigmoidea, donde en el límite térmico inferior, la curva se aproxima al punto cero de desarrollo asintóticamente (Marco, 2001).

Se ha encontrado que existe una relación inversamente proporcional entre la temperatura y la tasa de desarrollo de los insectos (Hernández, 2010), lo cual significa que a medida que se incrementa la temperatura la duración de un estadio particular del ciclo de vida de un insecto se reduce. Esta ha sido la base para el desarrollo del concepto de Días Grado de Desarrollo o Unidades Calor, que en el caso de los insectos proporciona una base muy precisa para predecir el desarrollo.

La tasa de desarrollo, se define como la proporción del desarrollo alcanzado por día y se obtiene dividiendo 1 entre la duración en días. Para calcular la temperatura base o umbral mínima, se utiliza el modelo de regresión lineal simple para relacionar la tasa de desarrollo con los diferentes niveles de temperatura de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$Y = a + bx$$

donde:

**Y** = tasa de desarrollo (variable dependiente)

**x** = nivel de temperatura (variable independiente)

**a** = ordenada del origen

**b** = coeficiente de regresión (pendiente de la recta)

Para obtener la Temperatura base de desarrollo para cada estadio, se despeja del modelo, el valor de x correspondiente a una tasa de desarrollo igual a 0.

Existen algunos ejemplos de la aplicación de modelos lineales para el pronóstico de la dinámica poblacional de *D. citri* como el realizado por (Díaz et al., 2010) quienes estimaron el número de generaciones potenciales de *D. citri*,

asumiendo que todo el año tiene condiciones para reproducirse. Nava et al. (2007), analizaron la influencia del origen geográfico sobre los requerimientos térmicos del vector.

Por otra parte, en los trabajos reportados sobre la caracterización de los requerimientos térmicos de este insecto, existe una gran variación en los valores estimados para la temperatura base de desarrollo de este insecto, la cual según (Liu y Tsai, 2000) es de 10.81 °C, mientras que (Nava et al., 2007) la ubican en 13.9 °C. Lo anterior se debe principalmente a que ninguno de los autores ha evaluado tratamientos a temperaturas entre los 15 y los 10 °C. En la Figura 2.2 se muestran los datos disponibles en la literatura y que relacionan la tasa de desarrollo de *D. citri* con la temperatura.

## **2.5. Avances en el desarrollo y aplicación de modelos de pronóstico al manejo de problemas fitosanitarios.**

Algunos de los sistemas más utilizados en la vigilancia epidemiológica fitosanitaria y que se basan en el análisis climático son el CLIMEX (Sutherst et al., 1999) y el NAPPFAST (NCSU APHIS Plant Pest Forecasting System; Magarey et al., 2007). Estos sistemas en general combinan bases de datos climáticas con criterios y algoritmos para estimar índices de confort de los organismos. Los sistemas de información geográfica, son componentes esenciales en estas aplicaciones para la representación de la variabilidad espacial. El NAPPFAST es la base del sistema de vigilancia que opera el Servicio de Inspección Sanitaria de Plantas y Animales (APHIS), del Departamento de Agricultura de los estados Unidos en colaboración con la Universidad Estatal de Carolina del Norte (NCSU).

En México, el Sistema de Alerta Fitosanitaria del Estado de Guanajuato (Quijano et al., 2010), ha conjuntado aplicaciones basadas en modelos de simulación de la dinámica poblacional de organismos dañinos con bases de datos del clima para generar Estudios de Riesgo y boletines de Alerta de plagas como el gusano de la raíz del maíz (*Diabrotica virgifera zea* K. y S.), el chapulín

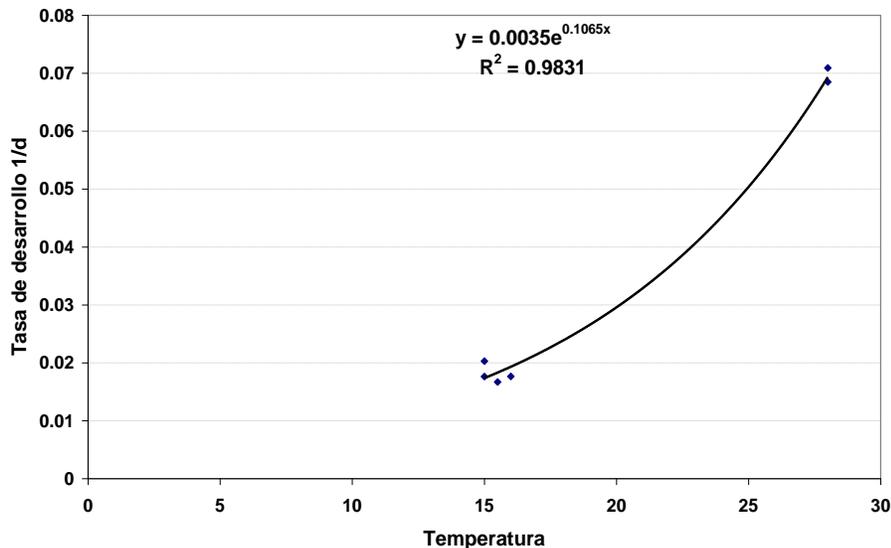


Figura 2.2. Relación entre la tasa de desarrollo de *D. citri* y la temperatura, de acuerdo con datos de la literatura.

(*Sphenarium purpurascens* Charpentier) y la roya del frijol (*Uromyces phaseoli*). En esta estrategia colaboran de manera muy estrecha el Instituto nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y pecuarias y al Comité Estatal de Sanidad Vegetal de Guanajuato.

## 2.6. Enfoque de Modelación dinámica.

Los modelos matemáticos proveen un lenguaje científico y cuantitativo para describir las relaciones complejas que determinan el comportamiento de las plagas y enfermedades. Existen diferentes enfoques para el modelado matemático de los procesos que tienen que ver con la introducción, establecimiento y dispersión de organismos dañinos, desde la simple correlación y regresión lineal que representan relaciones estáticas entre eventos, hasta los complejos sistemas de ecuaciones diferenciales que explican los procesos de infección o colonización de un hospedante por un organismo dañino y sus efectos en la producción (Thornley y France, 2007).

Los modelos dinámicos, o ecológicos permiten identificar y entender los procesos que son decisivos en el comportamiento de los problemas fitosanitarios.

Los parámetros en las ecuaciones del modelo corresponden a las propiedades o características que determinan el comportamiento dinámico de los organismos. Las ecuaciones diferenciales formuladas en este tipo de modelos, usualmente deben resolverse utilizando métodos numéricos (Thornley y France, 2007), ya que éstos facilitan la inclusión de tantas variables como sea necesario para representar la dinámica del sistema. Por esta razón los modelos dinámicos están constituidos por un conjunto de ecuaciones de integración numérica de tasas de cambio.

En un modelo dinámico o ecológico, las variables representan cantidades que cambian con respecto al tiempo. Existen diferentes categorías de variables, las cuales cumplen diferentes funciones dentro del modelo, las más importantes son:

- Variables de Estado, las cuales representan la acumulación de materiales, energía o información y definen el estado del sistema en cualquier instante de tiempo, ejemplos típicos de variables de estado son la población de insectos, la incidencia de una enfermedad, la materia seca acumulada de un cultivo, etc.
- Tasas de Cambio, que representan la velocidad a la que los estados aumentan o disminuyen su nivel. Estas variables tienen dimensiones de Unidades por tiempo (Thornley y France, 2007).

Las variables de estado pueden afectar a las tasas de cambio, originando el comportamiento no lineal que es característico de la mayoría de los sistemas biológicos y se denomina retroalimentación. Cuando la tasa de cambio varía de manera proporcional a la variable de estado, ocurre una retroalimentación positiva, ocasionando un crecimiento o decrecimiento exponencial en el proceso. Si la tasa de cambio varía de manera proporcional e inversa al estado, entonces el comportamiento se sigue una tendencia asintótica y se denomina retroalimentación negativa (Haefner, 2005).

Algunos estudios previos sobre el riesgo asociado con *D. citri* y consecuentemente con la dispersión del HLB en México, clasifican prácticamente todas las áreas citrícolas del país como zonas de alto riesgo para la infección por el HLB (Díaz et al., 2010; Aldama-Aguilera et al., 2011). Una característica común de estos estudios es que en su metodología asignan un peso similar a la superficie plantada con cítricos y a las características agrometeorológicas de esas zonas.

La importancia de las interacciones clima-plaga-hospedante en la infección de cítricos por el HLB ha sido señalada por varios autores (Zhao, 2010; Bassanezi, 2010), quienes relacionan el incremento en las tasas de infección por esta enfermedad con la presencia de poblaciones elevadas del psílido. Por otra parte, la dinámica poblacional de *D. citri* está fuertemente asociada a la fenología del cítrico, debido a que la oviposición requiere de la existencia de brotes vegetativos tiernos en el árbol. (Tsai et al., 2002; Hall & Albrigo, 2007; Hall et al., 2007; 2011; Sétamou et al., 2008).

Para describir estas interacciones se han propuesto diferentes tipos de modelos matemáticos, desde funciones lineales simples que relacionan la presencia del organismo dañino con la ocurrencia de ciertos rangos de temperaturas o humedad relativa (Magarey et al., 2007), hasta modelos ecológicos que describen la interacción entre las plantas, las plagas y el ambiente (Rafos, 2003; Arambout et al., 2009; Ladányi & Horváth, 2010; Rosa et al., 2011; Gutierrez & Ponti 2011). El modelaje es una técnica que puede ser de gran utilidad para estimar la distribución potencial de una plaga nueva en una región, desde los primeros estadios de la invasión, proporcionando elementos de conocimiento para la planeación de las actividades de monitoreo y de erradicación (Magarey et al., 2007).

### III. METODOLOGIA

La presente investigación forma parte del proyecto “Manejo de la enfermedad Huanglongbing (HLB) mediante el control de poblaciones del vector *Diaphorina citri* (Hemiptera:Psyllidae), el psílido asiático de los cítricos” (2009-108591) de la convocatoria 2009 del Fondo Sectorial de la Secretaría de Ganadería, Agricultura, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (FONSEC:SAGARPA-CONACYT). Los estudios se llevaron a cabo en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro y en el Laboratorio de Modelaje dinámico del Campo Experimental Bajío del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Para el desarrollo de este proyecto se llevaron a cabo las siguientes etapas:

Caracterización de los requerimientos térmicos de los diferentes estadios de *Diaphorina citri*.

Construcción y pruebas de ajuste del Modelo de dinámica poblacional de *D. citri*.

Estimación de la distribución potencial de *D. citri* en México.

#### **3.1. Caracterización de los requerimientos térmicos de los diferentes estadios de *D. citri*.**

Esta etapa se llevó a cabo en el Laboratorio de caracterización de Organismos dañinos del Campo Experimental Bajío del INIFAP.

En primera instancia se estableció una cría de *D. citri*, lo cual se hizo a partir de huevos y ninfas de *D. citri*, proporcionados por personal del Laboratorio de Entomología del Campo Experimental Tecomán del INIFAP en Colima y de adultos colectados en los estados de Guanajuato y Morelos. Los insectos se colocaron en plantas de limonaria y de limón, las cuales se colocaron en jaulas de madera forradas con organza dentro de un invernadero del Campo Experimental Bajío. Estas plantas se monitorearon diariamente y en cuanto se detectaron



oviposiciones, las plantas con huevecillos fueron trasladadas al Laboratorio de caracterización de organismos dañinos para colocarse en las cámaras de crecimiento.

Se utilizaron dos tipos de cámara bioclimática, una de marca CARON modelo 3010

que cuenta con sensores de temperatura, humedad mantienen una desviación máxima de  $\pm 0.5\%$  para los valores de temperatura y humedad relativa; además se utilizó una cámara Lumistel modelo ICP-19 con sensores de temperatura, humedad relativa y fotoperiodo, con una variación máxima de  $\pm 0.5\%$  para los registros de temperatura y humedad relativa (Figura 3.1).

Como medida de verificación de los registros ambientales se colocó un sensor de humedad relativa y temperatura, de la marca Spectrum dentro de la cámara, durante un periodo de 45 días, considerando que el máximo tiempo en que *D. citri* completa su ciclo, de huevo a adulto es de 47 a 49 días, además del registro de este sensor, se realizó una observación del registro diario de la temperatura que señalaban los sensores propios de la cámara.

Los tratamientos evaluados consistieron en el establecimiento de huevecillos recién ovipositados de *D. citri* a temperaturas constantes en los niveles de 10, 13, 15, 18, 20, 25 y 30 °C. La cantidad de huevecillos para cada tratamiento fue variable, dependiendo de la intensidad de la oviposición detectada en las plantas de limonaria, teniéndose desde 30 hasta 100 huevecillos por planta.

En cada tratamiento se observó y registró diariamente la cantidad de individuos que pasaron al siguiente estadio, a saber ninfa y adulto.

Con los datos obtenidos de duración del período de desarrollo desde huevecillo hasta adulto en cada nivel de temperatura, se calcularon la tasa de desarrollo y la temperatura base de acuerdo con la metodología citada por (Hernández, 2010).

### **3.2. Construcción y pruebas de ajuste del Modelo de dinámica poblacional de *D. citri*.**

El modelo de dinámica poblacional de *D. citri* se desarrolló a través de las siguientes actividades:

- Desarrollo del modelo conceptual y construcción del algoritmo computacional.
- Verificación del comportamiento del Modelo por comparación con datos de campo.
- Aplicación del modelo de dinámica poblacional de *D. citri* para delimitar las zonas agrícolas del país con mayor riesgo de incidencia del HLB.

El algoritmo computacional del modelo se desarrolló en la plataforma Vensim, versión 4.2a, el cual cuenta con una interface gráfica que permite escribir el código del programa a partir del diagrama de flujo del mismo. Las constantes del modelo se establecieron a partir de los datos de la literatura y los datos experimentales obtenidos en este proyecto. Los procesos que se incluyeron en este modelo son:

- Apareamiento y reproducción, donde se tomaron en cuenta la prolificidad promedio de las hembras y la fracción de hembras fértiles en la población.

- Oviposición, proceso que se modeló en función de la presencia de brotes tiernos en el hospedante.
- Eclosión y desarrollo de ninfas, procesos dependientes de la temperatura.
- Maduración y longevidad de los Adultos, el cual depende de la temperatura.

En la Figura 3.2 se muestra el diagrama causal con las variables y relaciones descritas anteriormente.

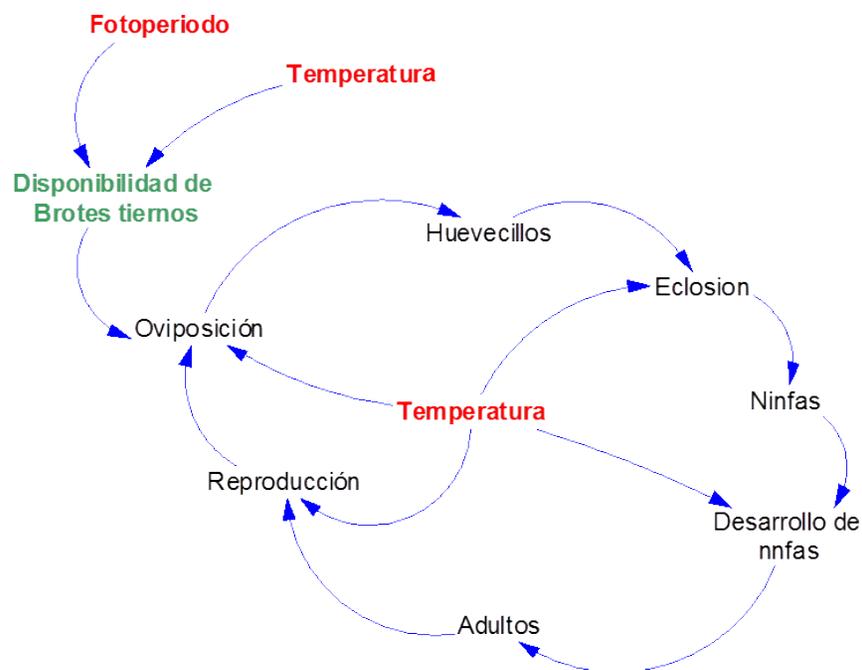


Figura 3.2. Diagrama causal del modelo de dinámica poblacional de *D. citri*.

El modelo de dinámica poblacional de *D. citri* consta de dos módulos, el correspondiente al ciclo de vida del insecto y el de la fenología del cítrico. En la Figura 3.3, se presenta el diagrama de flujo del ciclo de vida de *D. citri*. Para propósitos de simplicidad se han omitido algunas constantes de respuesta del insecto a la temperatura y la relación con el hospedante se indica solo a través de la influencia de los brotes tiernos (texto en gris) sobre la oviposición.

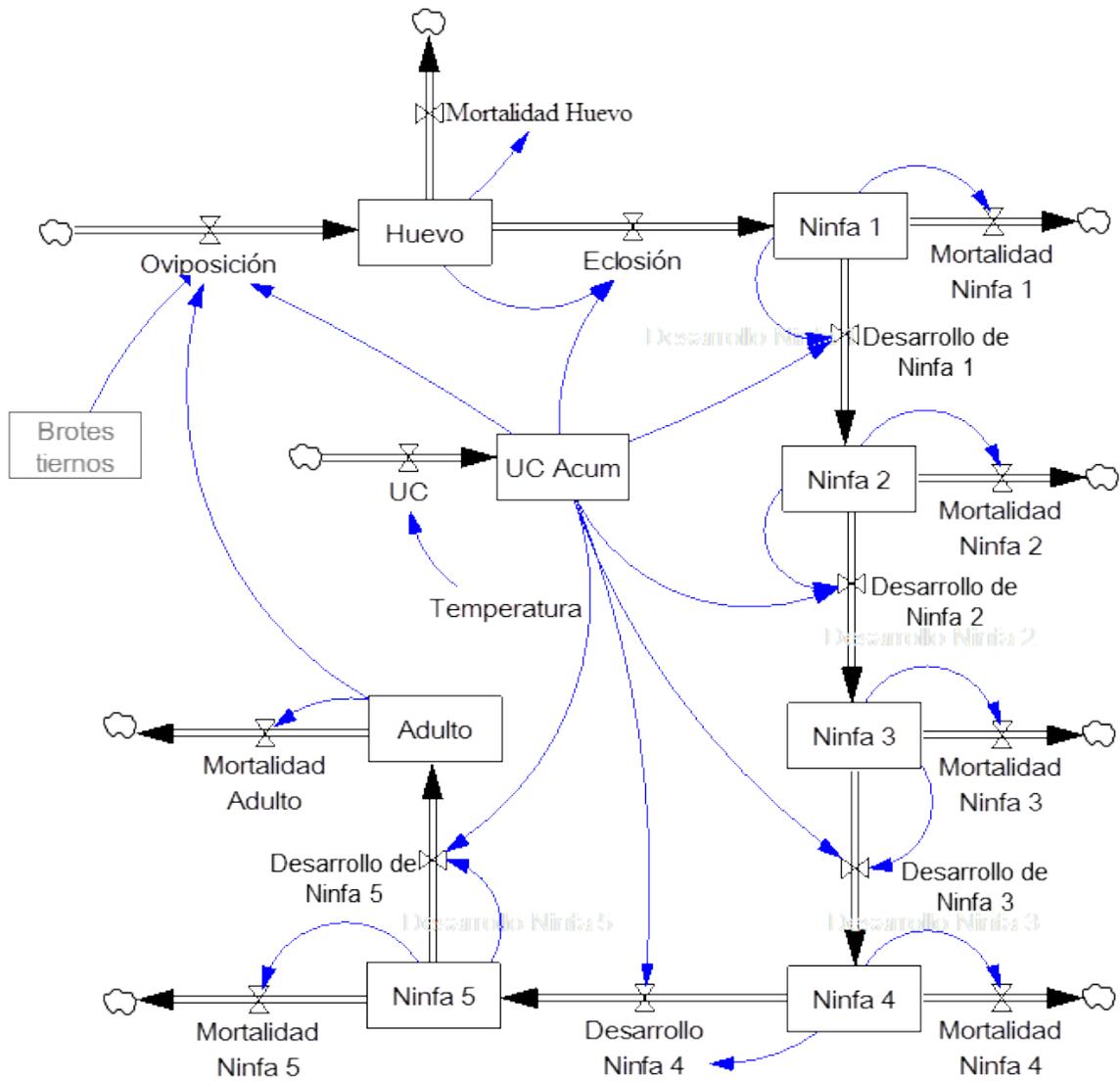


Figura 3.3. Diagrama de flujo del modelo del ciclo de vida de *D. citri*.

La lista de variables del módulo del ciclo de vida de *D. citri* y su descripción se presentan en el Cuadro 3.1.

**Cuadro 3.1. Listado de variables del módulo del ciclo de vida de *D. citri* y su descripción.**

VARIABLE	DEFINICION	UNIDADES
Huevo	Cantidad de huevecillos, la cual varía en función de la oviposición, la eclosión y la mortalidad de los mismos. = INTEG (Tasa oviposición-Eclosión-Mortalidad huevo)	Individuos
Ninfa1	Cantidad de ninfas del primer estadio, la cual se calcula a partir de la eclosión de los huevecillos. =INTEG (Eclosión-Tasa Desarrollo Ninfa1-Tasa Mortalidad Ninfa1)	Individuos
Ninfas 2-5	Cantidad de individuos en los estadios de ninfa 2 a la 5. = INTEG (Tasa Desarrollo Ninfa-Tasa Desarrollo Ninfa-Tasa Mortalidad Ninfa)	Individuos
Adulto	Cantidad de Adultos, esta variable se calcula a partir de una población inicial y a través del desarrollo de los estadios inmaduros = INTEG (Tasa Desarrollo Ninfa5-TDA-Tasa Mortalidad Adultos)	Individuos
Mortalidad huevo	Cantidad de huevecillos que mueren por día en función de la temperatura. = Huevo*fracción mortalidad huevo	Huevecillos/día
Mortalidad Ninfas	Cantidad de ninfas que mueren por día =(Ninfas*Fmort)	Individuos/día
Mortalidad Adultos	Cantidad de Adultos que mueren por día =fracción mortalidad adulto*Adultos	Individuos/día
Oviposición	Huevos ovipositados por día =Adultos*Proporción de hembras fértiles*Prolificidad de hembras (esta variable se calcula solo cuando hay brotes tiernos disponibles)	Huevos/día
Eclosión	Cantidad de huevecillos que eclosionan en función de la temperatura. =Huevo/Días desarrollo	Individuos/día
Desarrollo Ninfas 1-5	Cantidad de ninfas que se desarrollan por día en función de temperatura = Ninfas/Días Desarrollo Ninfas	Individuos/día
Brotos tiernos	Cantidad de Brotes tiernos desarrollándose en el cítrico (esta variable se define en el módulo de fenología del cítrico).	Cantidad de brotes
UC	Unidades calor acumuladas por día = ((Tmax + Tmin)/2)-Tb	°C /día
Tb	Temperatura base o umbral a partir de la cual el psílido de los cítricos puede desarrollarse =10.45	°C
Temperatura	Temperatura máxima diaria y Temperatura mínima diaria.	°C

En la Figura 3.4 se muestra el diagrama de flujo correspondiente a la fenología del cítrico y la producción de brotes tiernos. En función de la temperatura y los requerimientos térmicos del cítrico se calcula la iniciación de yemas vegetativas y el crecimiento del brote hasta que se convierte en una hoja madura.

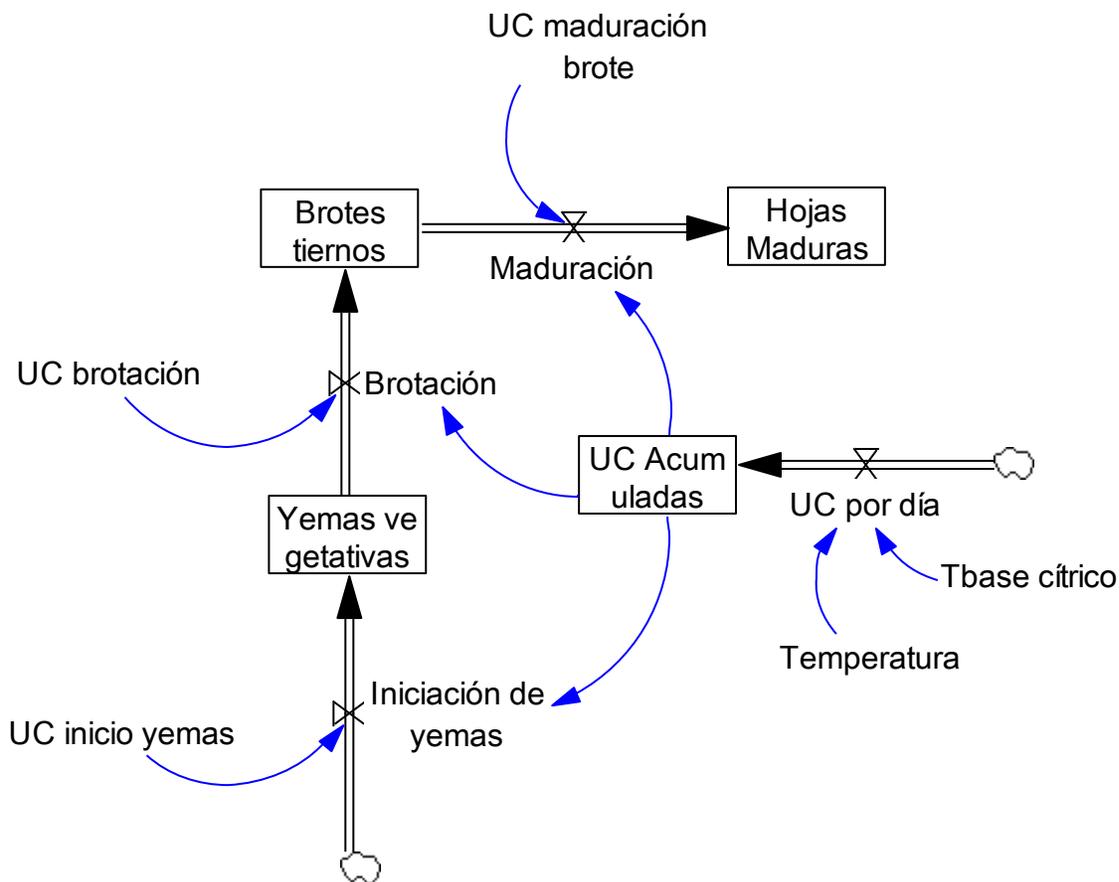


Figura 3.4. Diagrama del flujo del módulo de fenología y brotación del cítrico.

En el Cuadro 3.2 se presenta la lista de variables y la descripción de las mismas para el módulo de fenología del cítrico. En el Apéndice de esta tesis se incluye la documentación completa del modelo.

**Cuadro 3.2. Listado de variables del módulo de fenología del cítrico y su descripción.**

<b>VARIABLE</b>	<b>DEFINICION</b>	<b>UNIDADES</b>
Yemas vegetativas	Yemas iniciadas al inicio de la brotación =INTEG(Iniciación de yemas, UC inicio Yemas)	Cantidad de yemas
Brotos tiernos	Brotos tiernos en desarrollo =INTEG(Brotación, UC brotación)	Cantidad de brotes
Hojas maduras	Hojas que completaron su desarrollo =INTEG(Maduración, UC maduración brote)	Cantidad de hojas
UC Acumuladas	Unidades Calor acumuladas por el cítrico =INTEG(UC por día)	°C
Iniciación de yemas	Tasa de aparición de nuevas yemas =si(UC Acumuladas>UC inicio yemas, 80)	Yemas / día
UC inicio yemas	Unidades Calor necesarias para inicio de yemas = 10.1	°C
Brotación	Tasa de aparición de nuevos brotes =si(UC Acumuladas>UC brotación, yemas*1)	Brotos / día
UC brotación	260	°C
Maduración	Tasa de maduración de los brotes =si(UC Acumuladas>UC maduración brote, 1)	Hojas / día
UC maduración brote	390.8	
UC por día	Unidades calor acumuladas por día =((Tmax + Tmin)/2)-Tb	°C/día
Tbase cítrico	Temperatura límite por debajo de la cual el cítrico no se desarrolla = 12.8	°C
Temperatura	Temperatura máxima diaria y Temperatura mínima diaria.	°C

Para probar el ajuste de este modelo se utilizaron datos relativos a la dinámica de los diferentes estadios del PAC, obtenidos por personal del INIFAP en Colima de Abril a Diciembre del 2010. Los datos corresponden a conteos de

individuos por brote por árbol realizados quincenalmente en 2 localidades, Coquimatlán, y Tecomán. La información meteorológica se obtuvo de la red nacional de estaciones estatales agroclimatológicas que administra el INIFAP. En el Cuadro 3.3 se muestran las dinámicas observadas de los estadios de Huevo y Ninfa por muestra de 20 árboles, así como los brotes vegetativos del cítrico para las 2 localidades analizadas.

Cuadro 3.3. Dinámicas observadas de brotes del cítrico y de los diferentes estadios de *D. citri* en dos localidades del estado de Colima en 2010 (Velázquez-Monreal et al., 2011).

FECHA	COQUIMATLAN				INIFAP			
	BROTOS	HUEVO	NINFA	ADULTO	BROTOS	HUEVO	NINFA	ADULTO
abr-22	200	613	468	5	101	574	190	0
may-07	98	812	300.8	5	62	256	67	5
may-20	92	989	685	17	53	460	31.5	0
jun-03	246	624	118	7	78	197	75	0
jun-16	51	647	508	2	55	77	69.5	0
jul-02	32	1963	447	28	27	173	100	13
jul-16	42	1308	1414	20	14	561	303.5	166
jul-30	43	1796	625	39	36	238	110	42
ago-13	95	569	564	18	64	67	9.5	5
ago-27	39	839	1194	25	15	583	11.5	0
sep-09	47	0	0	0	2	78	35.5	0
sep-22	79	211	230	1	24	78	35.5	0
oct-07	184	597	460	11	29	31	30.5	8
oct-21	86	909	773	42	176	227	76	0
nov-08	67	1015	658	22	113	0	0	0
nov-19	72	443	454	5	110	8	7	0
dic-03	111	876	502	76	62	180	7.5	0
dic-16	157	796	1378	18	91	212	81	50

Para probar el ajuste se construyó un gráfico de dispersión XY con los datos observados (X) y los simulados (Y) para la cantidad de huevos, ninfas y adultos, ajustándose un modelo de regresión lineal simple. Se probaron hipótesis sobre la significancia de la regresión en cada caso a través del estadístico F calculada, asimismo se consideró el coeficiente de determinación  $r^2$  y el Error estándar.

### **3.3. Estimación de la distribución potencial de *D. citri* en México.**

Se utilizaron dos métodos para estimar la distribución potencial de *D. citri*, un método correlativo basado en el cálculo de índices agroclimáticos y el otro basado en estimaciones cuantitativas de la población del insecto a lo largo de un período de 23 años. Lo anterior con el propósito de resaltar la bondad de utilizar modelos comprensivos y conservativos como el desarrollado en el presente estudio.

**3.3.1. Cálculo de índices agroclimáticos.** Los factores que se consideraron como determinantes para la distribución de *D. citri* fueron: a) la disponibilidad de hospedantes susceptibles y b) la presencia de condiciones climáticas favorables para el desarrollo del insecto.

En cuanto a la disponibilidad de hospedante susceptible, se consideró que toda la superficie plantada con cítricos cumplía esta condición, independientemente de la densidad. Las especies que se incluyeron fueron: Naranja dulce (*Citrus sinensis*), Limón mexicano (*Citrus aurantifolia*), Mandarina (*Citrus reticulata* Blanco), y Toronja (*Citrus maxima* Burm. Merr.). Los datos sobre la cobertura de estas especies cítricas se obtuvieron del portal del SIAP y corresponden a las superficies presentes en 2011.

Estas zonas cítricas se clasificaron de acuerdo a la coincidencia de las condiciones climáticas con: a) Las condiciones favorables para la producción

constante de brotes vegetativos en los cítricos y b) Las condiciones favorables para la reproducción y el crecimiento de las poblaciones del psílido.

Para el desarrollo de los cítricos se generaron 2 índices, uno basado en la temperatura y otro en la humedad disponible para el crecimiento y formación de brotes vegetativos. En cuanto a la temperatura, se consideró un umbral de entre 13 y 35 °C como favorable para el desarrollo de los cítricos (Hardy & Khurshid 2007). El índice de temperaturas favorables para el crecimiento del cítrico se denominó *IFTCG*, y se calculó de la siguiente manera:

$$IFTCG = \frac{\text{No. de días con temperaturas dentro del umbral favorable para el cítrico/}}{\text{No. de días del año.}}$$

Para la disponibilidad de humedad se definió el índice de duración de la estación de crecimiento, el cual se denominó *ILGPC*, calculándose de la siguiente manera:

$$ILGPC = \frac{\text{No. de días con humedad disponible para el crecimiento del cítrico /}}{\text{No. de días del año.}}$$

La duración de la estación de crecimiento se calculó a partir del balance de humedad al nivel diario, donde la precipitación (*P*) se comparó con la evapotranspiración potencial (*PET*), de acuerdo al método propuesto por FAO (1996). Cuando *P* excede al 50% de *PET* se considera el inicio de la estación de crecimiento y se calcula la humedad residual, es decir la humedad remanente de restar a *P* el 50% de *PET*. La estación de crecimiento termina cuando la humedad residual se agota por completo.

En cuanto a las condiciones favorables para el crecimiento y reproducción de *D. citri* se generaron 2 índices, el primero referente a la proporción de días con temperaturas dentro del rango de adaptación del insecto, denominado *IFTVD*, cuya fórmula es la siguiente:

*IFTVD = No. de días con temperaturas dentro del rango de adaptación del insecto / No. de días del año.*

Las temperaturas cardinales para el desarrollo del psílido se ubicaron entre los 10°C y los 33°C de acuerdo con lo reportado por Liu & Tsai (2000).

El otro índice consistió en el cálculo del número potencial de generaciones, el cual se utilizó como indicador de la tasa potencial de desarrollo del insecto. Este índice se denominó *INPGV* y su cálculo se efectuó de la siguiente manera:

*INPGV = número potencial de generaciones de D. citri en un año / Máximo número de generaciones potenciales obtenido.*

De acuerdo con Liu & Tsai (2000), *D. citri* requiere 250.3 Unidades Calor para completar una generación, desde Huevo hasta Adulto. La temperatura base de desarrollo, de acuerdo a los mismos autores se fijó en 10 °C. Para estimar las Unidades Calor por día se utilizó el método residual como sigue:

*Unidades Calor por día = ((Tmax+Tmin)/2)-Temperatura base de desarrollo*

El número de generaciones potenciales (*NPG*) de *D. citri* en un año se calculó de la siguiente manera:

*NPG = Unidades Calor acumuladas por año / Unidades Calor requeridas para completar una generación*

Finalmente todos estos índices se integraron en un Índice Combinado Agroclimático, (*IICS*) para *D. citri* el cual se obtuvo mediante la siguiente expresión:

*IICS = (IFTCG + ILGPC + ITTVG + INPGV) / 4*

Los índices agroclimáticos se calcularon para cada año de las series históricas de cada estación a partir de los datos diarios. Con esta información se construyó la curva de probabilidad acumulada de excedencia para cada estación. Se utilizó el valor correspondiente al 80 % de probabilidad para representar la

condición de cada estación. Los datos se interpolaron utilizando el procedimiento del inverso medio de la distancia ponderado por el número de estaciones.

**3.3.2. Estimación de la población de *D. citri* utilizando el modelo de dinámica poblacional.** Aunque el modelo permite calcular cada uno de los estadios de vida del insecto, se utilizó el número total de Huevos y Ninfas al final del período como indicador del potencial de establecimiento del mismo en las diferentes regiones citrícolas.

Se tomó como referencia una huerta de 1 ha con un promedio de 200 árboles. La simulación se inició en el mes de enero asumiendo que solo adultos llegan a la huerta en número de 1 por cada 2 árboles (0.5/árbol). Dado que el modelo solo ha sido probado en naranja dulce se utilizó el cronograma de brotación de las diferentes especies de cítricos predominantes en cada estado de acuerdo con el SENASICA (2008) y se alimentó con este esquema al modelo para calcular la disponibilidad de brotes tiernos. Los huevos y las ninfas se establecieron en valor cero al inicio de la simulación.

Para el cálculo tanto de los índices agroclimáticos como para la dinámica poblacional del insecto se utilizaron datos diarios de 2985 estaciones de la red del Servicio Meteorológico Nacional, SMN. Las variables consideradas fueron Precipitación (PP, mm), Temperatura máxima (Tmax, °C), y Temperatura mínima (Tmin, °C). Las estaciones utilizadas representan una serie histórica desde 1950 hasta 2010, sin embargo al aplicar un procedimiento de control de calidad de los datos se decidió trabajar solamente con el período 1967 al 2008 por presentar una mayor consistencia en los datos. Finalmente la base de datos se integró con 2470 estaciones que en promedio tienen una serie histórica de 23 años.

Los mapas se elaboraron utilizando el software Arc Map 10.1. Cada factor considerado en la distribución de *D. citri* se manejó como una capa de información independiente. En el caso de la disponibilidad de hospedante susceptible, se utilizó la capa de área agrícola filtrada con los municipios en que se reporta

superficie de cítricos por parte del SIAP. Para la ejecución de simulaciones múltiples se utilizó el sistema SIMPEC (Sistema de Información para el Monitoreo del Potencial Ecológico de los Cultivos), desarrollado por Quijano et al. (2011), el cual integra una base de datos climáticos diarios, una base de datos con las descripciones de los perfiles representativos de las unidades de suelo predominantes en México y modelos de simulación del crecimiento de cultivos y de plagas y enfermedades agrícolas.

Para analizar la correspondencia de la regionalización resultante de este proceso con la situación actual de esta enfermedad en el país se compararon los resultados con la distribución actual del HLB en México. La Figura 3.5 muestra los sitios con detecciones de HLB en México desde Marzo de 2009 hasta Diciembre de 2011. La península de Yucatán y la parte central de la Costa del Pacífico, las cuales comparten un clima de tipo tropical son las áreas más afectadas por el HLB.

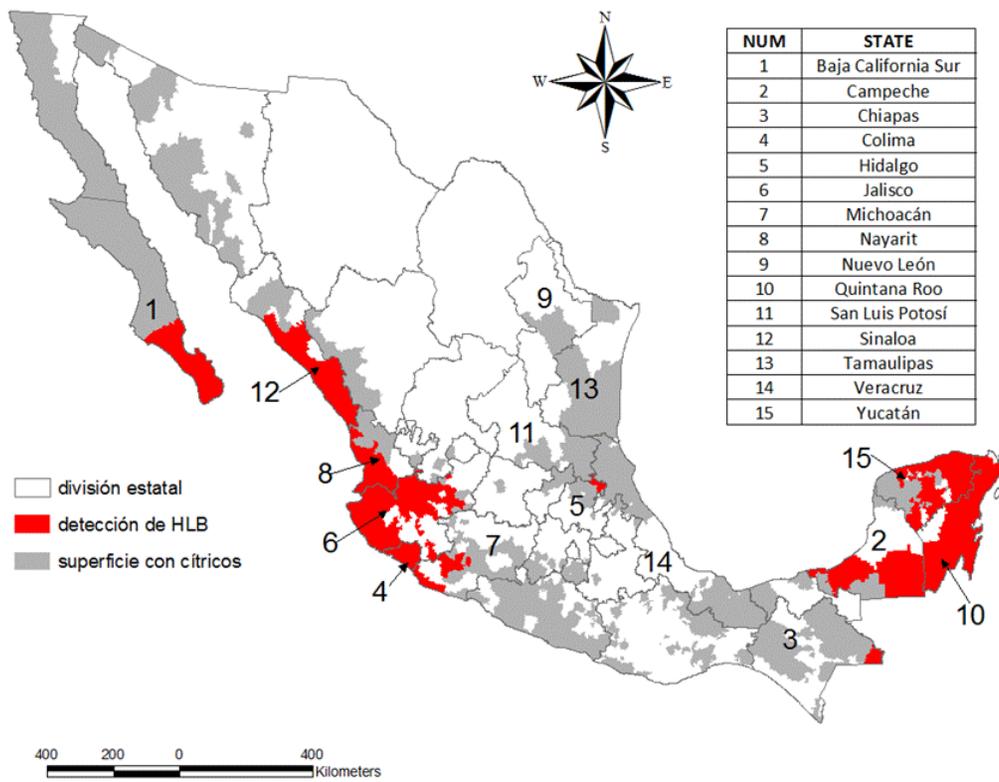


Figura 3.5. Detecciones del HLB en México de Marzo de 2009 a Diciembre de 2011.  
 Fuente: SENASICA (2012).

#### IV. RESULTADOS Y DISCUSION

Esta sección se ha dividido en 3 partes, las cuales corresponden a los objetivos específicos de esta investigación, que son la verificación de la temperatura base de desarrollo del insecto, las pruebas de ajuste del modelo de simulación y la utilización del modelo para estimar la distribución potencial de *D. citri* en las regiones citrícolas del país..

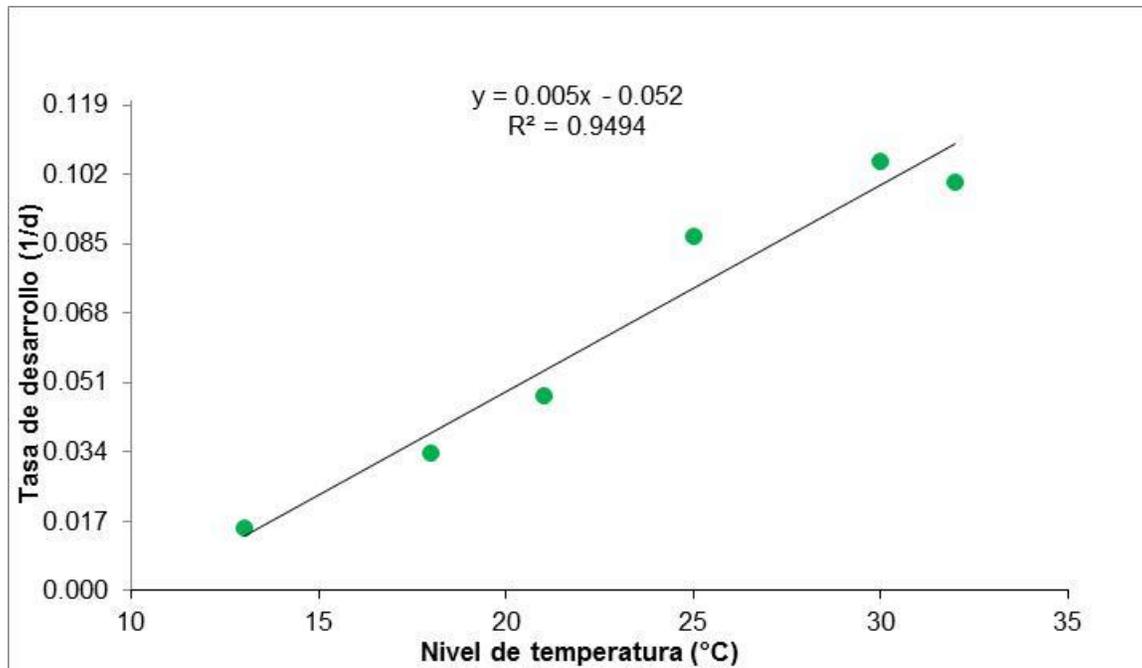
##### 4.1. Verificación experimental de la temperatura base de desarrollo de *D. citri*

En el Cuadro 4.1, se presentan los resultados de la evaluación de la tasa de desarrollo de *D. citri* a diferentes temperaturas. Los especímenes colocados a las temperaturas de 10 °C y 32 °C no se desarrollaron y murieron. Resultados similares han sido reportados por Liu & Tsai (2000).

Cuadro 4.1 Duración del desarrollo en días de *D. citri* desde Huevo hasta Adulto a diferentes temperaturas constantes

Temperatura °C	Número de	
	individuos (n)	Huevo a Adulto
10	123	—
13	67	67
18	100	30
20	86	21
25	80	16
30	100	12
32	42	12

En la Figura 4.1 se muestra la recta de regresión ajustada para la tasa de desarrollo en función de la temperatura.



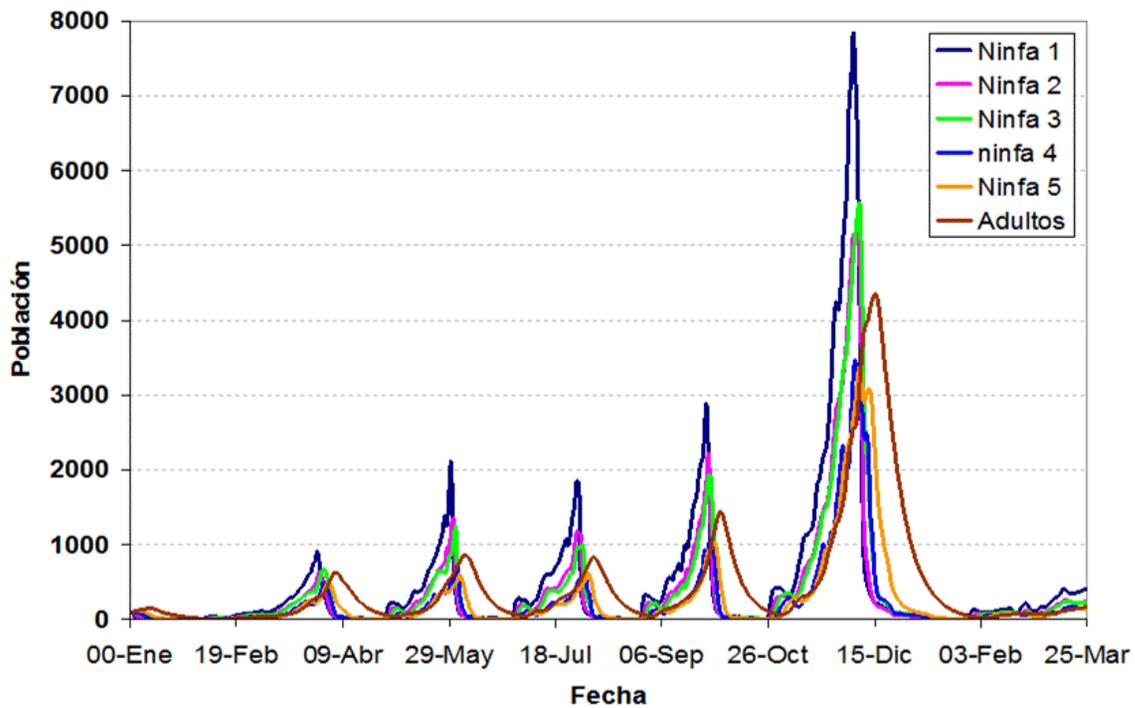
**Figura 4.1 Modelo de regresión ajustado entre la tasa de desarrollo y la temperatura para *D. citri*.**

La temperatura base de desarrollo para *D. citri* se estimó en 10.4 °C, lo cual es coincidente con los resultados obtenidos por Liu & Tsai (2000) para la duración total del ciclo de este insecto.

#### **4.2 Pruebas de ajuste del modelo de simulación de *D. citri*.**

La primera verificación del comportamiento del modelo consistió en asegurar que la salida del mismo tuviera correspondencia con la biología del insecto, para ello se realizaron simulaciones alimentando el modelo con datos meteorológicos de diferentes estaciones del país. En la Figura 4.2. se muestra el resultado de la simulación del crecimiento de la población de *D. citri* en la estación Gallo Verde, en el municipio de Martínez de la Torre en el estado de Veracruz, considerando el año 2009. El modelo calculó 5 generaciones completas de este insecto, apreciándose un sensible incremento en la población total del insecto hacia finales del año.

La dinámica poblacional obtenida se ajusta plenamente a lo que se conoce del ciclo de vida de este insecto, observándose la ocurrencia de generaciones múltiples en un mismo año. Por otra parte la duración del ciclo de vida se acorta en los meses de verano por efecto de una acumulación de calor más acelerada.



**Figura 4.2. Dinámica poblacional simulada de *D. citri* para la estación Gallo Verde en Veracruz en 2009.**

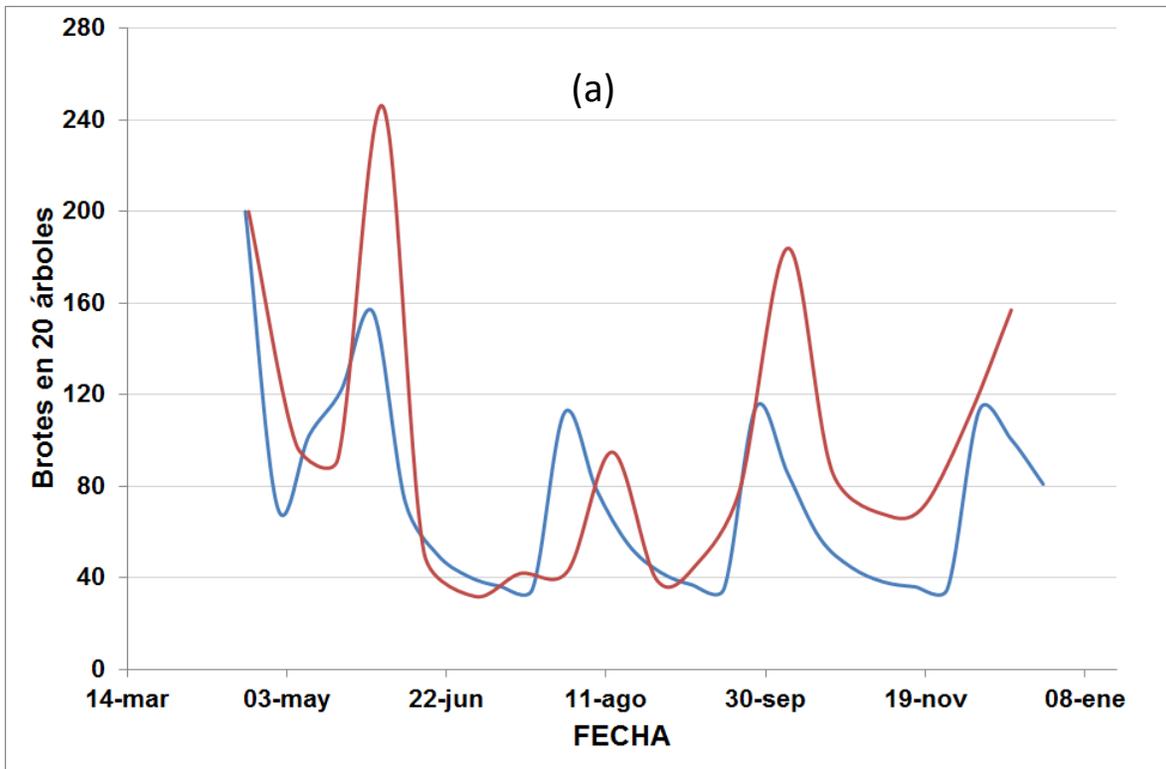
En el Cuadro 4.2 se presentan brotes vegetativos y las cantidades de individuos de los diferentes estadios de *D. citri*, estimados a través del modelo de simulación para las localidades de Coquimatlán y Tecomán (INIFAP) en 2010. La simulación, al igual que el muestreo, representa la suma de individuos en 20 árboles.

Cuadro 4.2. Dinámicas simuladas de brotes vegetativos del cítrico y de los diferentes estadios de *D. citri* en dos localidades del estado de Colima en 2010.

FECHA	COQUIMATLAN				INIFAP			
	BROTOS	HUEVO	NINFA	ADULTO	BROTOS	HUEVO	NINFA	ADULTO
<b>abr-22</b>	200	613	468	5	101	574	190	0
<b>may-07</b>	102	720	535	12	78	317	93	14
<b>may-20</b>	122	1320	729	26	80	381	47	9
<b>jun-03</b>	156	624	308	39	103	219	30	16
<b>jun-16</b>	60	608	616	14	125	183	73	5
<b>jul-02</b>	41	2412	812	36	54	336	67	20
<b>jul-16</b>	35	2019	1105	30	60	542	240	128
<b>jul-30</b>	112	1904	847	49	97	409	202	13
<b>ago-13</b>	63	727	891	26	65	217	46	67
<b>ago-27</b>	43	481	1069	12	52	618	26	12
<b>sep-09</b>	37	135	367	9	50	104	21	4
<b>sep-22</b>	40	200	414	11	104	82	41	10
<b>oct-07</b>	86	394	603	23	63	40	26	19
<b>oct-21</b>	57	1228	671	37	131	13	70	4
<b>nov-08</b>	38	1009	519	21	192	19	34	25
<b>nov-19</b>	36	582	622	15	102	37	17	9
<b>dic-03</b>	113	909	541	49	72	79	14	6
<b>dic-16</b>	101	893	819	33	62	38	52	13

En la Figura 4.3 se presenta la comparación entre los brotes observados y simulados del cítrico en Coquimatlán e INIFAP-Tecomán en Colima. Los datos observados corresponden a monitoreos realizados por Velázquez et al., (2011). Los datos simulados se representan por la línea roja, mientras que los observados corresponden a la línea azul. Como puede apreciarse hay coincidencia en las fechas de brotación, aunque no en la cantidad de brotes.

En la Figura 4.4 se muestra la regresión entre los datos simulados y observados de brotes vegetativos en las dos localidades. El coeficiente de determinación  $R^2$  es ligeramente mayor en Coquimatlán (0.57) que en Tecomán (0.4). Estos datos indican que está componente del modelo debe seguirse perfeccionando para lograr un mejor ajuste.



Observado —■— Simulado

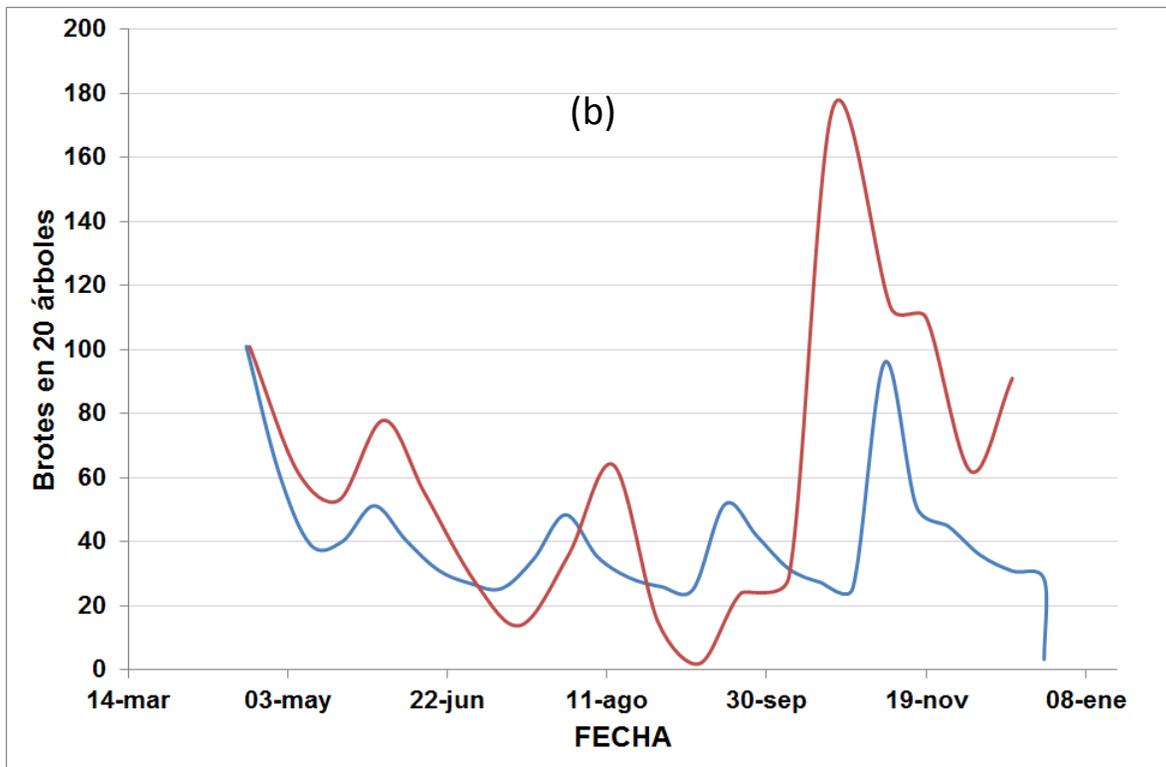


Figura 4.3. Dinámicas observada y simulada de Huevecillos de *D. citri* para las localidades de Coquimatlán (a) e INIFAP-Tecomán (b), en Colima en 2010.

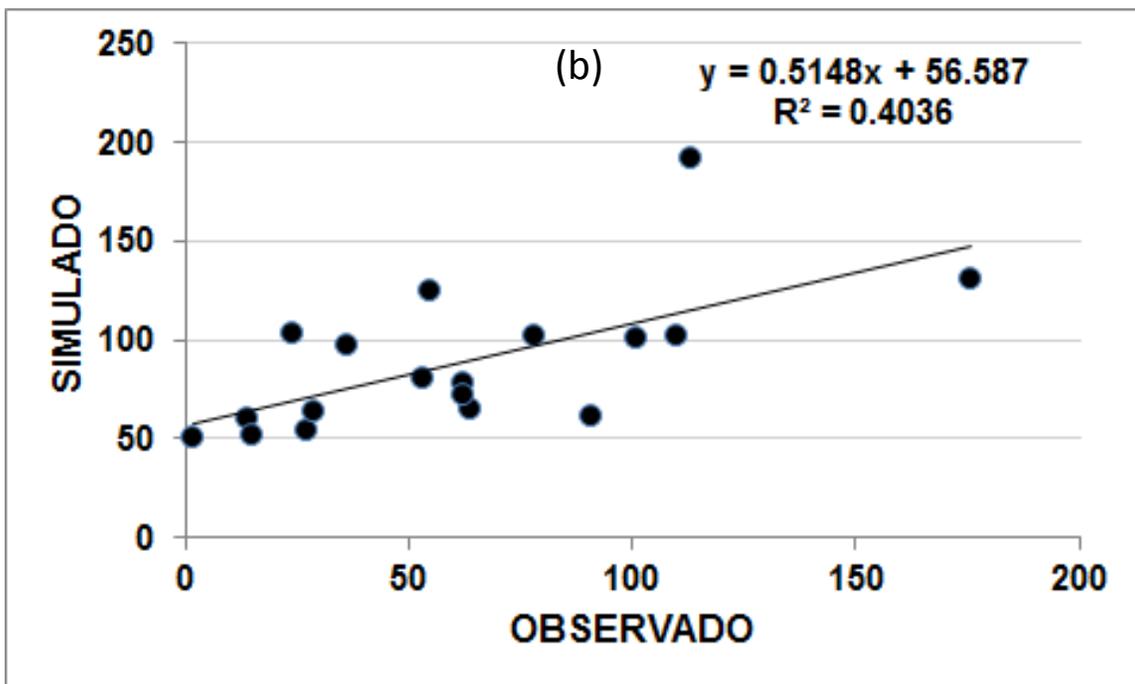
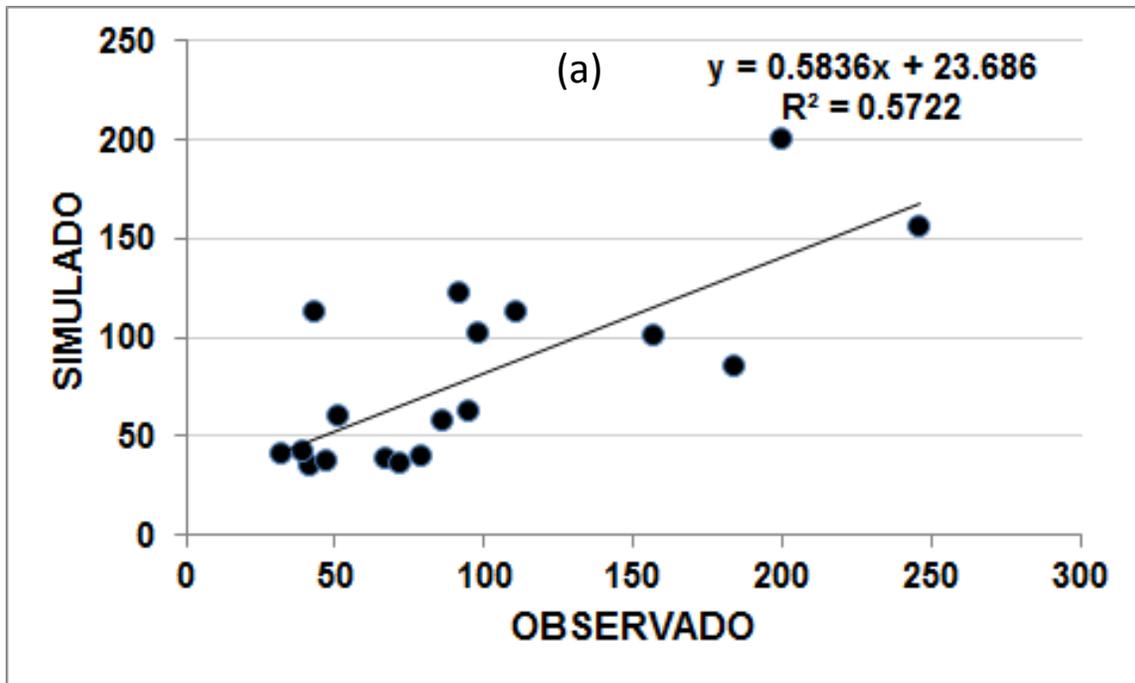
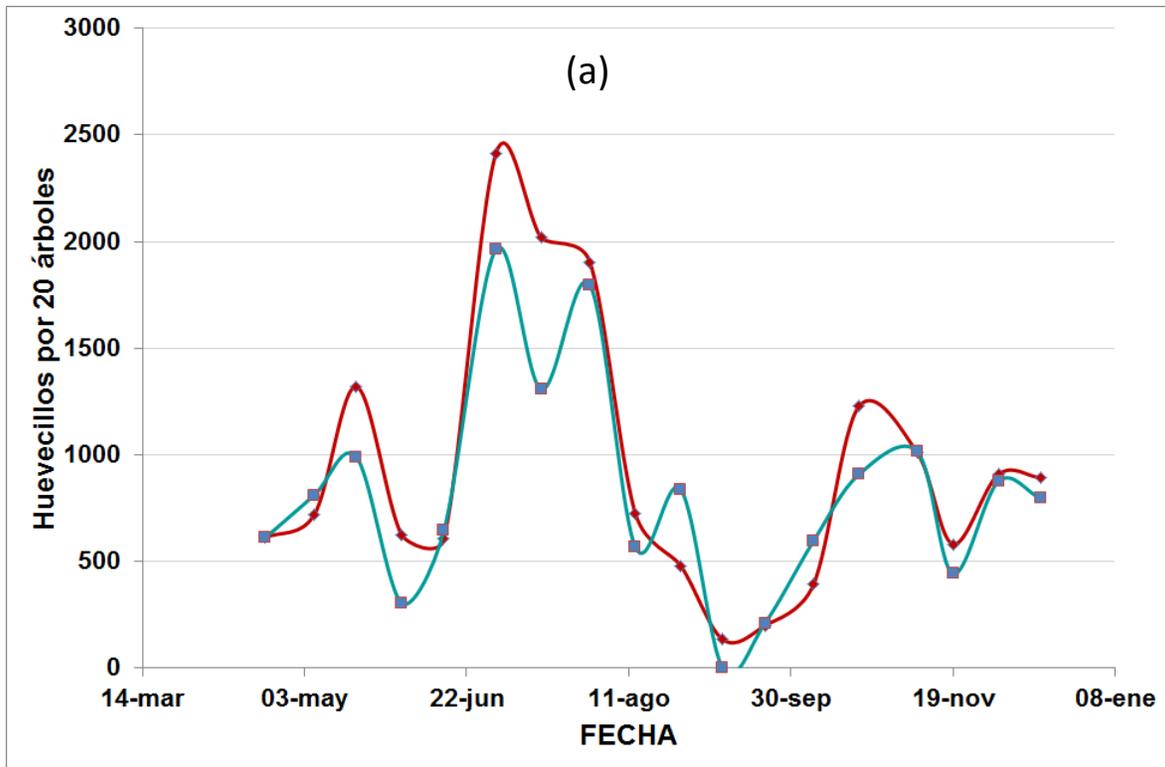


Figura 4.4. Modelos de regresión ajustados para los datos observados y simulados de brotes de cítrico en las localidades de Coquimatlán (a) e INIFAP-Tecomán (b), en Colima en 2010.

En la Figura 4.5 se muestra la comparación entre la dinámica observada y simulada de Huevecillos para las localidades de Coquimatlán e INIFAP-Tecomán



Observado —■— Simulado

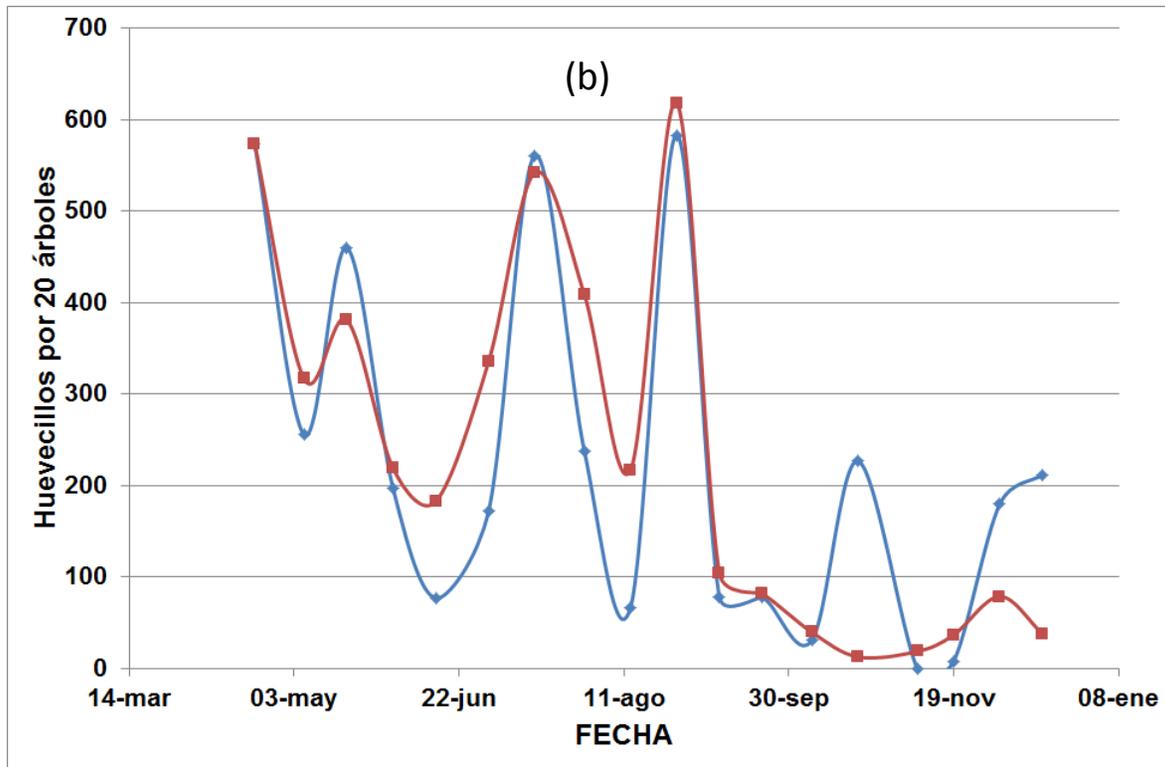
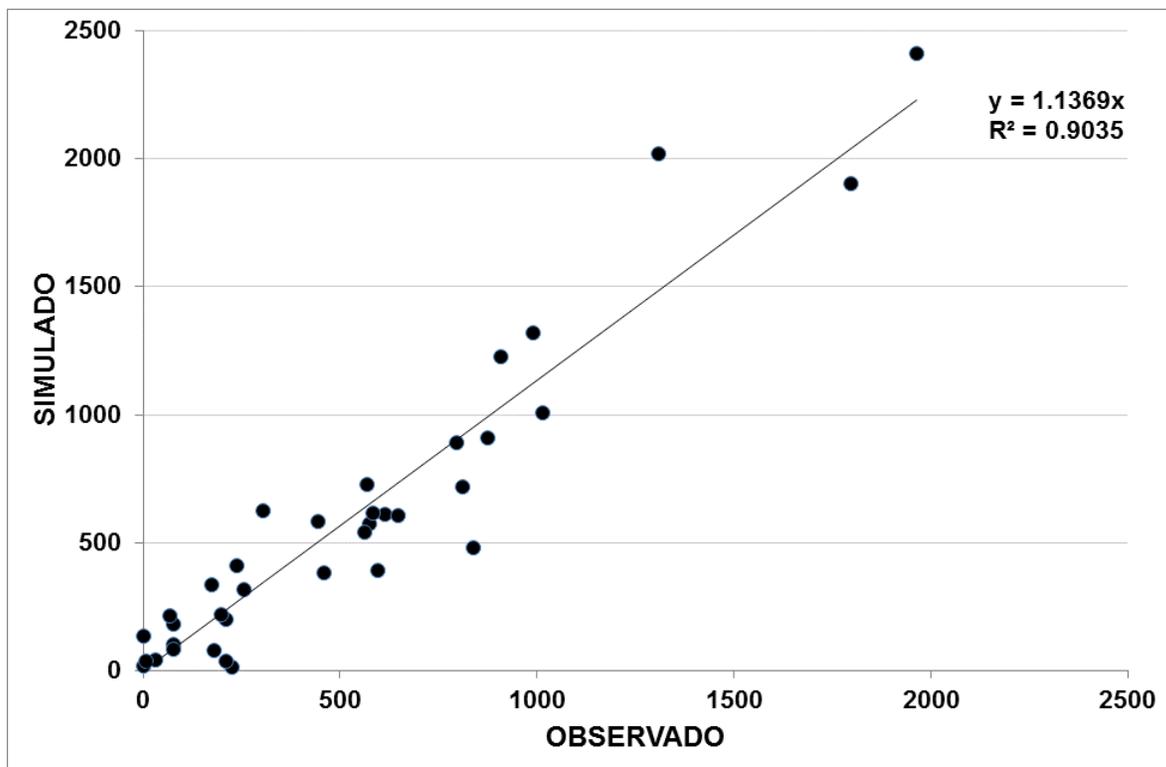


Figura 4.5. Dinámicas observada y simulada de Huevecillos de *D. citri* para las localidades de Coquimatlán (a) e INIFAP-Tecomán (b), en Colima en 2010.

en Colima. Los datos simulados siguen las variaciones mayores en la población de huevecillos, aunque algunas fluctuaciones leves no son registradas por la simulación, como la caída de la población hasta el nivel cero en Coquimatlán, y el pico de población en INIFAP-Tecomán en Octubre que el modelo no pudo registrar

En la Figura 4.6, se presenta la prueba de bondad de ajuste, la cual se efectuó mediante un análisis de regresión lineal simple entre los datos observados y simulados para la variable huevecillos de *D. citri*. El modelo obtenido se ajustó por el origen y se aproxima a una línea 1:1, con un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0.9. La prueba de F para la regresión entre lo simulado y observado resultó significativa con una probabilidad de error menor al 1%.



**Figura 4.6. Modelo de regresión ajustado entre los datos observados y simulados de Huevecillos de *D. citri* en dos localidades de Colima en 2010.**

En el Cuadro 4.3 se presentan la tabla de Análisis de Varianza para la regresión.

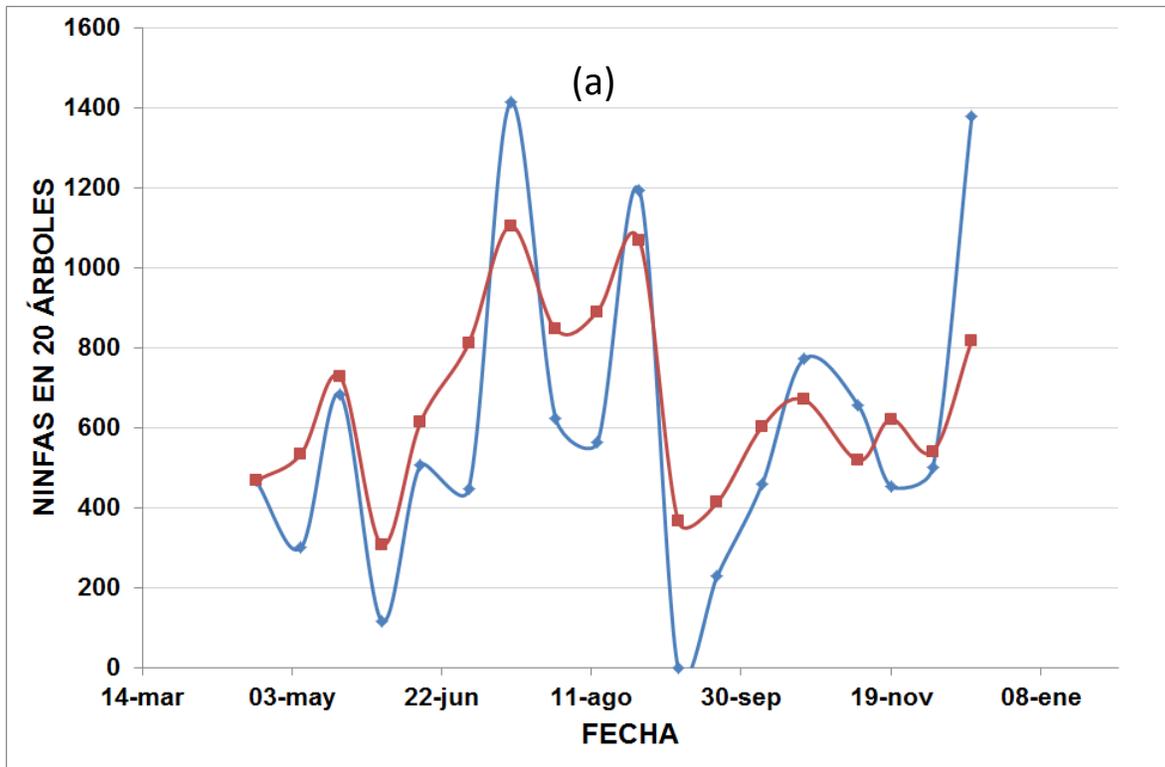
Cuadro 4.3. Análisis de varianza para la regresión entre los huevecillos observados y simulados de *D. citri*.

Fuente de variación	Grados de libertad	Sumas de Cuadrados	Cuadrados Medios	F calculada	Probabilidad
Regresión	1	10693496.51	10693496.5	319.52	7.34E-19
Residuos	34	1137885.38	33467.21		
Total	35	11831381.89			

En la Figura 4.7 se muestra la comparación entre las ninfas observadas y simuladas en las dos localidades bajo estudio. Nuevamente el modelo reproduce de manera cercana las fluctuaciones en la población de este estadio del insecto, aunque con mayor precisión en la cantidad de individuos en la localidad de INIFAP-Tecomán, donde la población se mantuvo en niveles bajos durante todo el año, con valores entre los 0 y 300 individuos.

En Coquimatlán, la fluctuación de las observaciones es mayor, registrándose variaciones muy drásticas como la registrada entre el 27 de agosto y el 9 de septiembre, donde la población cayó de 1200 individuos a prácticamente cero. En esta localidad el modelo, aunque siguió la tendencia y las fluctuaciones de la población se aprecian mayores desviaciones entre los datos observados y simulados.

En la Figura 4.8 se muestra el gráfico de regresión lineal construido para probar el ajuste entre los datos observados y simulados para la variable ninfas de *D. citri*. El modelo obtenido se ajustó por el origen y se aproxima a una línea 1:1, con un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0.75. La prueba de F para la regresión entre lo simulado y observado resultó significativa con una probabilidad de error menor al 1% (Cuadro 4.4).



Observado —◆— Simulado —■—

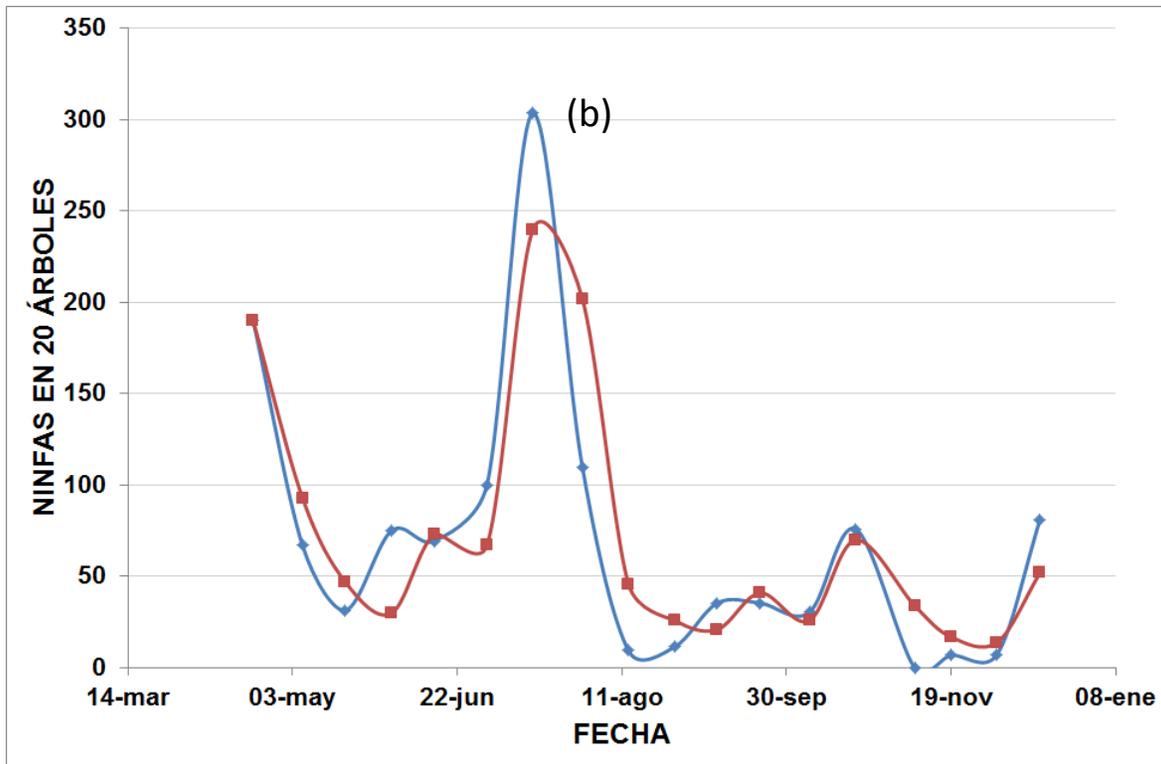


Figura 4.7. Dinámicas observada y simulada de Ninfas de *D. citri* para las localidades de Coquimatlán (a) e INIFAP-Tecomán (b), en Colima en 2010.

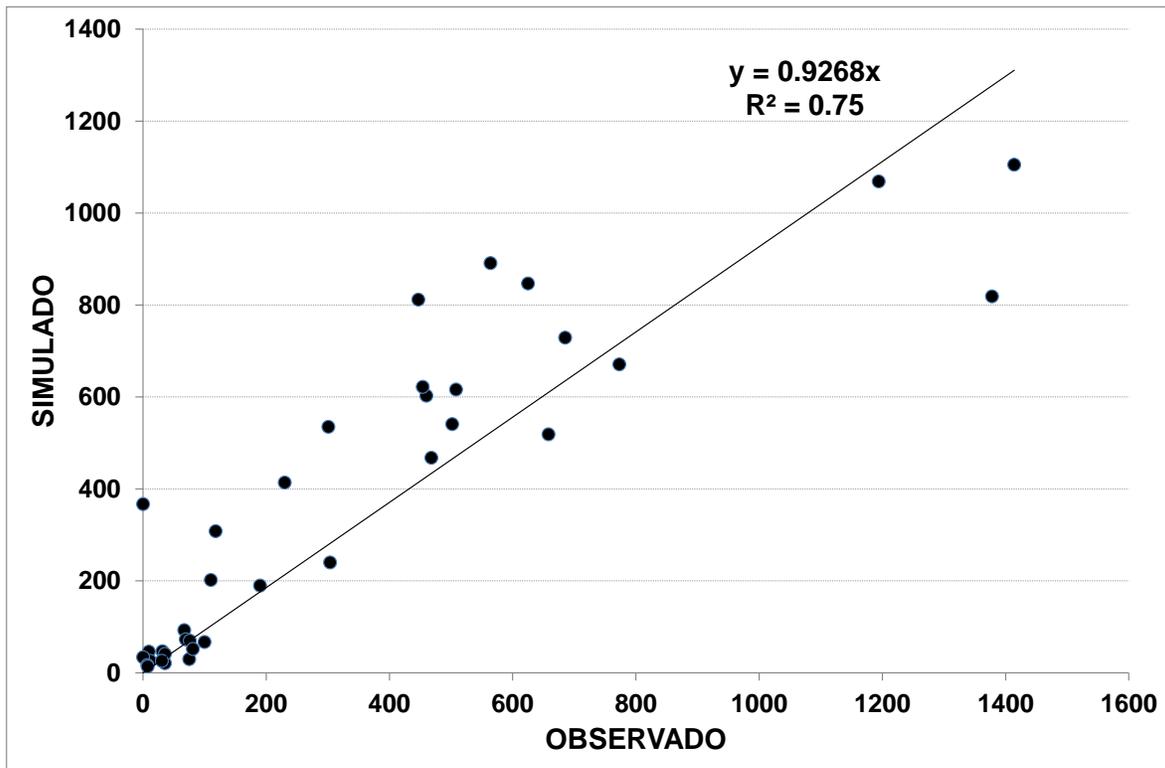


Figura 4.8 Modelo de regresión ajustado entre los datos observados y simulados de Ninfas de *D. citri* en dos localidades del estado de Colima.

Cuadro 4.4. Análisis de varianza para la regresión entre las ninfas observadas y simuladas de *D. citri*.

Fuente de variación	Grados de libertad	Sumas de Cuadrados	Cuadrados Medios	F calculada	Probabilidad
Regresión	1	3274324.34	3274324.35	135.22	2.14E-13
Residuos	34	823291.96	24214.47		
Total	35	4097616.31			

En lo que se refiere a la dinámica de Adultos, la Figura 4.9 muestra la comparación entre los datos simulados y observados. Nuevamente las tendencias son muy similares entre ambos grupos de datos, con diferenciales en las cantidades de individuos aún mayores que en las ninfas. En la Figura 4.10 se presenta el gráfico de regresión usado para probar el ajuste entre los datos observados y simulados para esta variable.

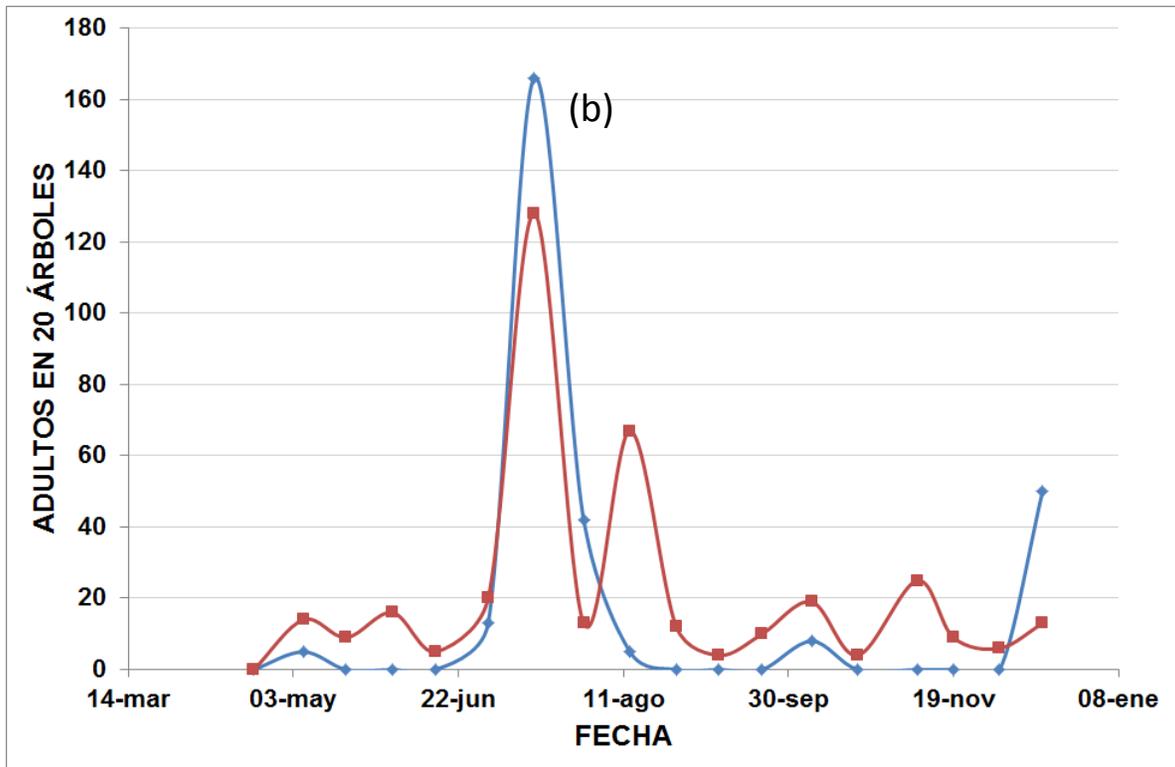
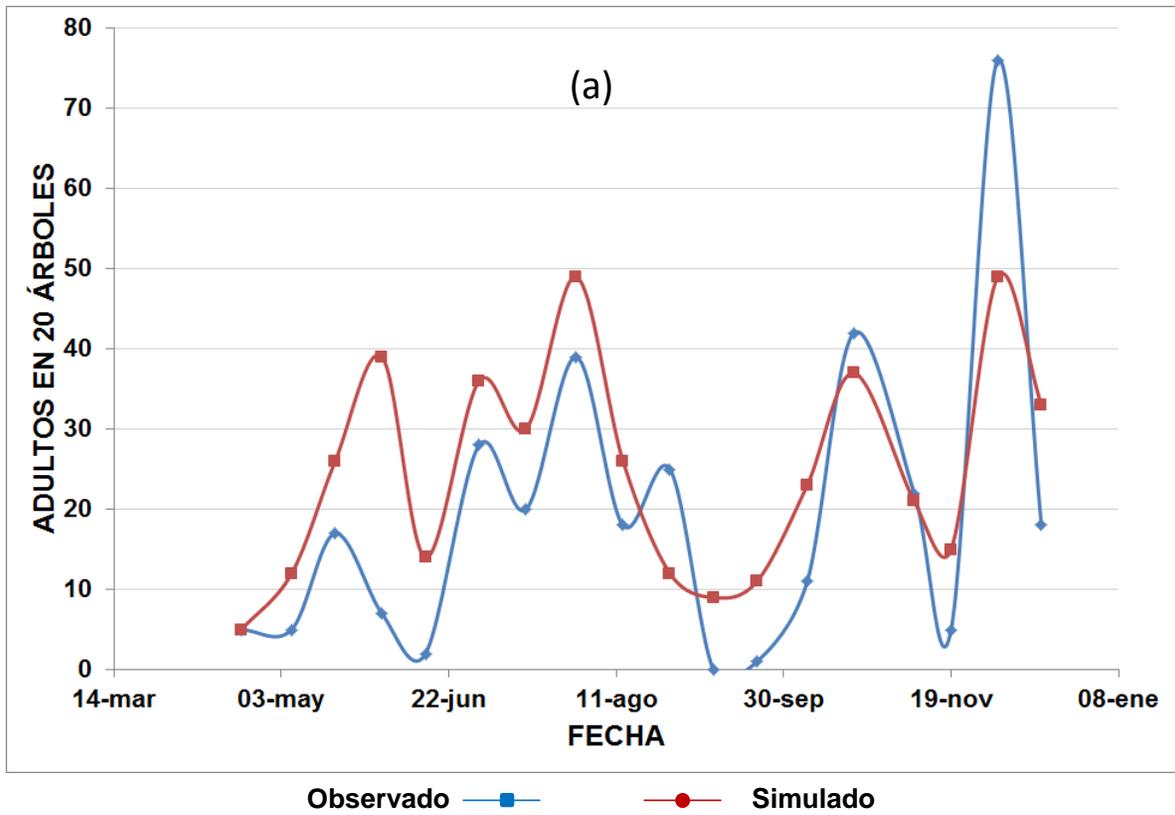


Figura 4.9. Dinámicas observada y simulada de Adultos de *D. citri* para las localidades de Coquimatlán (a) e INIFAP-Tecomán (b), en Colima en 2010.

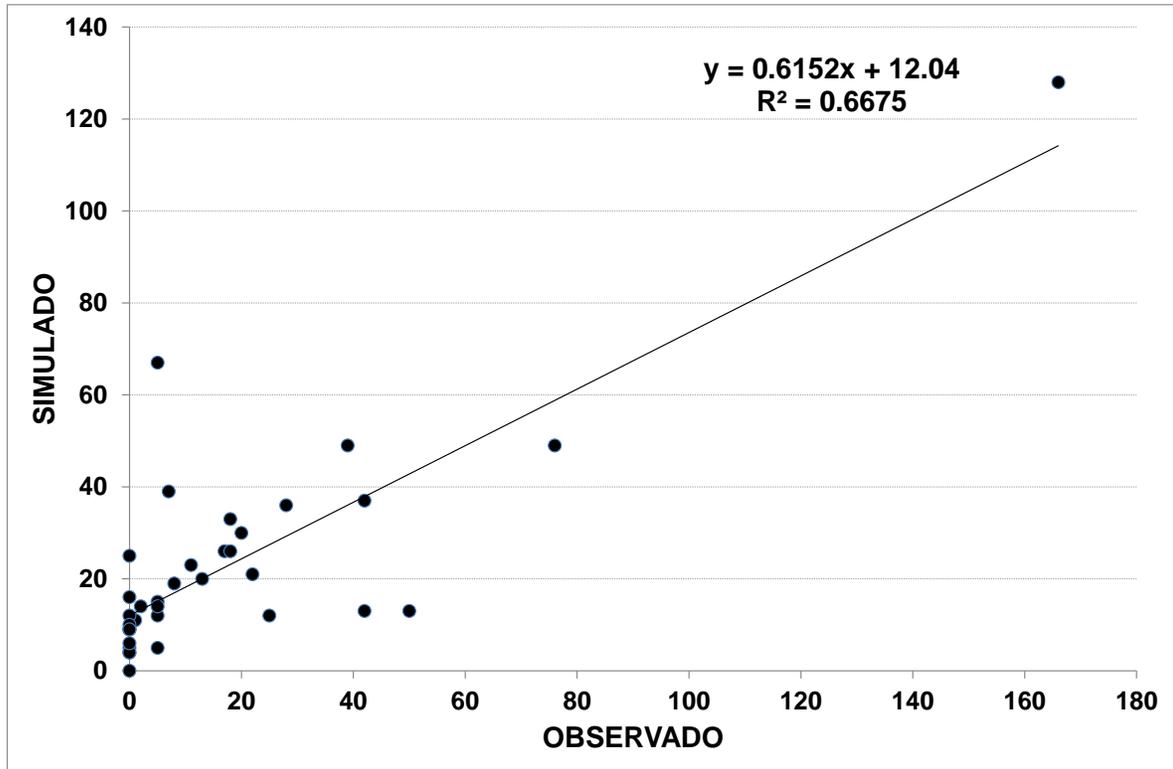


Figura 4.10 Modelo de regresión ajustado entre los datos observados y simulados de Adultos de *D. citri* en dos localidades del estado de Colima.

El modelo de regresión obtenido presentó un coeficiente de determinación de 0.66, el cual es más bajo que para Huevecillos o Ninfas. Aun así, la regresión resultó significativa con una probabilidad de error inferior a 1.2 e-09 (Cuadro 4.5).

Cuadro 4.5. Análisis de varianza para la regresión entre los adultos observados y simulados de *D. citri*.

Fuente de variación	Grados de libertad	Sumas de Cuadrados	Cuadrados Medios	F calculada	Probabilidad
Regresión	1	12722.69	12722.69	68.26	1.22E-09
Residuos	34	6336.94	186.38		
Total	35	19059.64			

Estos datos indican que el modelo es menos preciso para estimar la población de adultos que la de huevecillos o ninfas, lo cual puede ser debido a que en la estructura del modelo hace falta precisar de mejor manera el efecto de la migración. Por otra parte, el estadio de huevecillo es la variable del ciclo de vida

del insecto que el modelo estima con mayor precisión. En general, los resultados sugieren que el modelo de simulación puede ser usado con confiabilidad para estimar la dinámica poblacional del insecto, ya sea en apoyo a estudios epidemiológicos, o en el diseño de estrategias de manejo del insecto vector.

### 4.3. Estimación del riesgo de dispersión y establecimiento de *D. citri*.

**4.3.1. Cálculo de índices agroclimáticos.** En el Cuadro 4.4 se presentan los resultados de procesar las series climáticas de todo el país. Si se compara el valor promedio de días con condiciones favorables para los cítricos (98.55) y para el psílido (211.7), se puede apreciar que este factor es más restrictivo para el hospedante que para el insecto. En las localidades de la zona norte, en el invierno, la temperatura por lo general se ubica por debajo de los requerimientos del cítrico, lo cual afecta de manera indirecta al psílido, por la ausencia de brotes vegetativos. El promedio de días con condiciones favorables de humedad para el crecimiento de los cítricos fue de 200.75.

Cuadro 4.6. Estadísticas básicas de los resultados del comportamiento de los índices agroclimáticos relacionados con la distribución de *D. citri*.

Medida	Cítrico				<i>D. citri</i>				Integrado
	Días con T° favorable	IFTCG <sup>1</sup>	Días con humedad favorable	ILGPC <sup>2</sup>	Días con T° favorable	IFTVD <sup>3</sup>	Número de Generaciones	INPGV <sup>4</sup>	
Min	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Max	365	0.92	335.8	1	335.8	0.92	27	0.85	0.84
Media	98.55	0.45	200.75	0.27	211.7	0.58	14	0.5	0.51
Desv. Est.	146	0.24	87.6	0.4	69.35	0.19	5.2	0.19	0.18

1 índice de temperaturas favorables para el crecimiento de cítricos

2 índice de duración de la estación de crecimiento para el cítrico

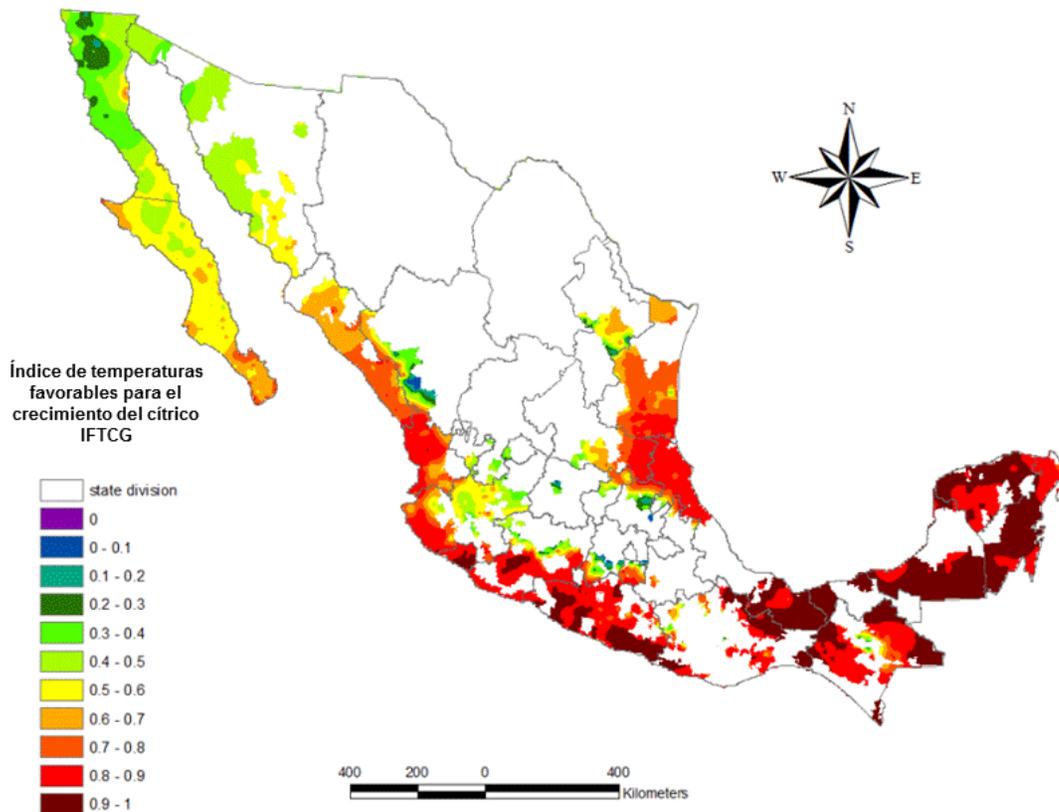
3 índice de temperaturas favorables para el desarrollo de *D. citri*

4 índice de generaciones potenciales para *D. citri*

5 Índice integrado de Condición agroclimática para *D. citri*

El número máximo de generaciones calculado para *D. citri* fue de 27, con una media de 14. Los valores de la desviación estándar para estos factores son indicativos de la gran variabilidad de las condiciones climáticas entre las zonas de producción de cítricos en México.

**4.3.1.1. Índice de disponibilidad de Hospedante susceptible.** Las Figuras 4.11 y 4.12 muestran los mapas de los 2 índices que describen las condiciones para el desarrollo del hospedante susceptible al 80% de probabilidad de excedencia. En ambos mapas el color rojo en la escala representa las condiciones más favorables para el crecimiento del cítrico y por lo tanto para la presencia de brotes vegetativos. El índice que representa la disponibilidad de condiciones favorables de temperatura para el hospedante (*IFTCG*), el cual se muestra en la Figura 4.11 muestra un descenso gradual en los valores del índice hacia las regiones del norte del país. Las condiciones más favorables de temperatura para la brotación de los cítricos se ubican en los estados de Campeche, Chiapas, Quintana Roo, el sur de Veracruz, Tabasco, Yucatán, y las zonas costeras de Colima, Guerrero y Michoacán, donde prácticamente todo el año hay condiciones propicias para la brotación de los cítricos y por consiguiente para la reproducción del psílido (Liu & Tsai 2000; Tsai et al., 2002; Hall et al., 2007; 2011).

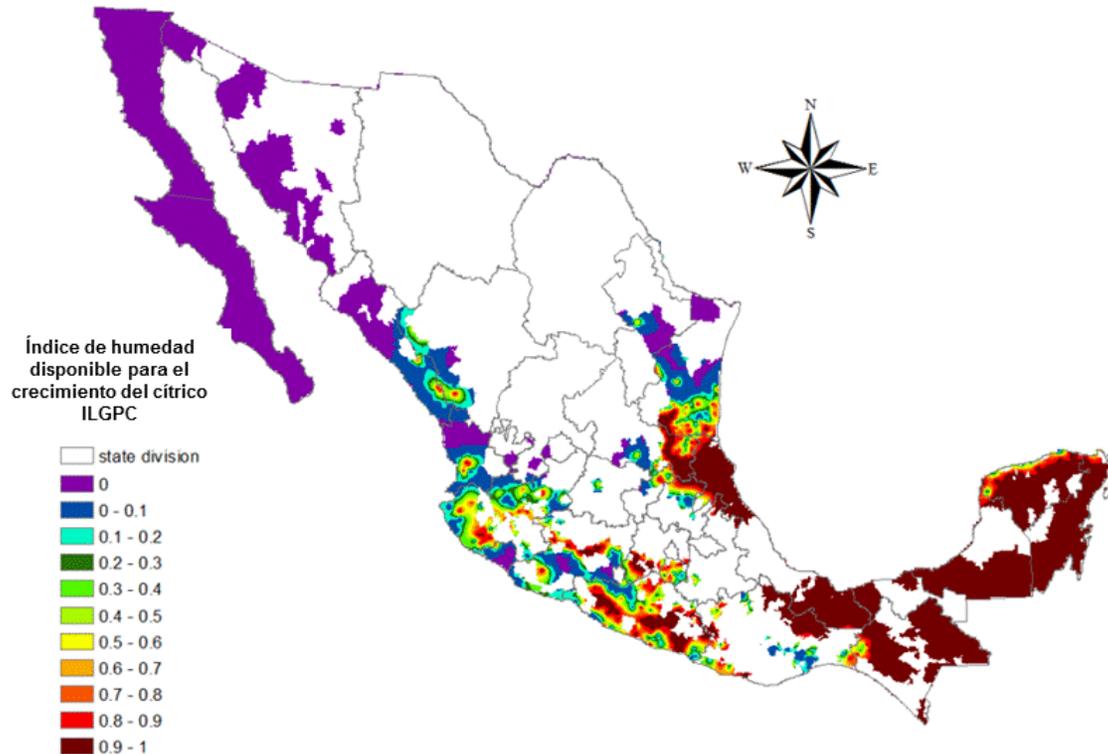


**Figura 4.11 Índice de condiciones favorables de temperatura para el crecimiento de los cítricos.**

En lo que se refiere a la disponibilidad de humedad, representada por el índice *ILGPC* (Figura 4.12), existe un contraste muy evidente entre las zonas cítricas del norte y del sur del país. En el sur la estación de crecimiento abarca prácticamente todo el año, mientras que en los estados del norte como Baja California, Nuevo León, Sinaloa, Sonora, y Tamaulipas, el período húmedo cubre solo alrededor de un 10% del año. Esta condición explica la distribución actual de la industria cítrica en el país, con la presencia de huertas irrigadas principalmente en la zona norte y la concentración de la superficie de limón mexicano y limón persa en el sur del país ([www.siap.gob.mx](http://www.siap.gob.mx)). Estas diferencias son también consistentes con la estacionalidad de la brotación de los cítricos,

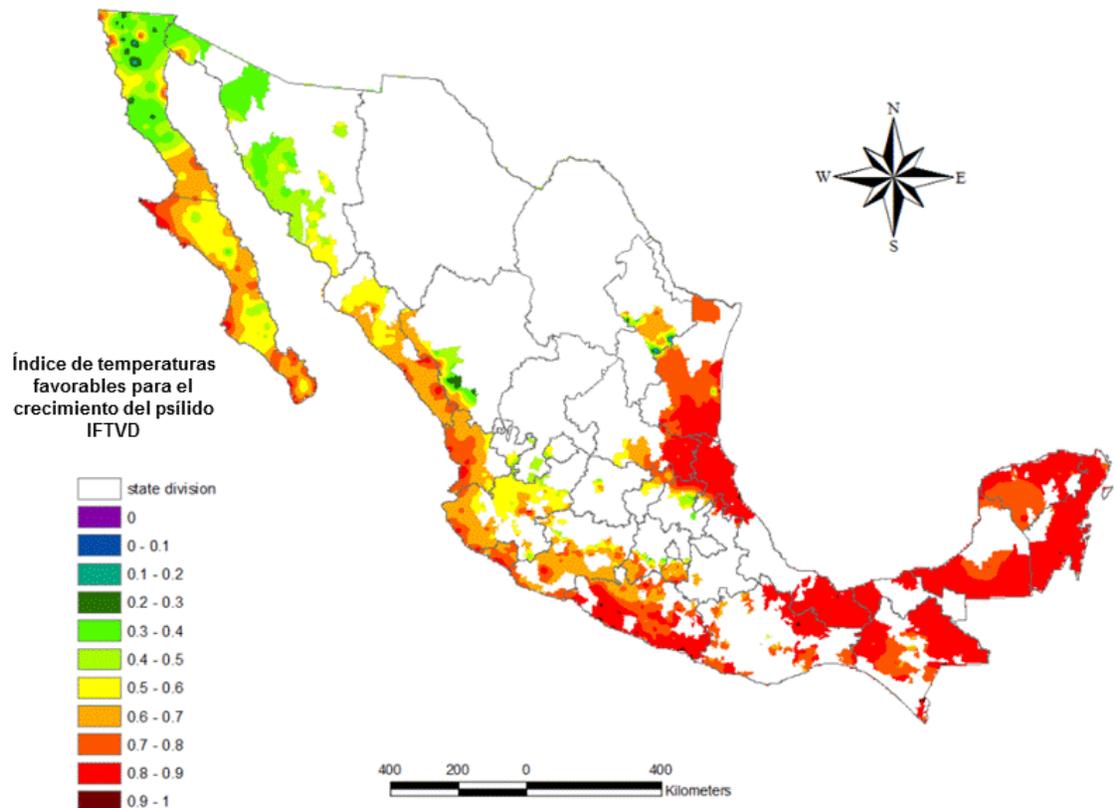
pues en los estados del sur el crecimiento vegetativo ocurre prácticamente todo el año, lo cual es más evidente en las diferentes especies de limón, mientras que en el norte las huertas en plena producción presentan brotaciones durante el otoño y a finales del invierno solamente (Curti-Díaz et al., 1996; 1998; Medina-Urrutia et al., 2008; SENASICA, 2008; Rocha y Padrón, 2009).

De acuerdo con estos resultados, las zonas con condiciones más favorables para la brotación de los cítricos coinciden en gran medida con las áreas en que el HLB ha sido detectado hasta ahora (Figura 3.4).



**Figura 4.12. Índice de condiciones favorables de humedad para el crecimiento de los cítricos.**

**4.3.1.2. Índice de condiciones favorables para el desarrollo de *D. citri*.** Los índices relativos a la presencia de condiciones favorables para el crecimiento y reproducción del psílido al 80% de probabilidad de excedencia se muestran en las Figuras 4.13 y 4.14. El índice *ITTVG*, representa la fracción del año en que la temperatura permanece dentro de los rangos de adaptación del insecto. Como puede apreciarse en la Figura 4, la mayor parte del país presenta valores medios y altos para este índice, con excepción de los estados de Sonora y Baja California. En los estados de Campeche, Chiapas, Quintana Roo, Tabasco, Yucatán, algunas zonas de Guerrero, y la región de “La Huasteca” donde convergen los estados de Hidalgo, San Luis Potosí, Tamaulipas, and Veracruz, las condiciones de temperatura son favorables para el desarrollo de *D. citri* a lo largo del año.

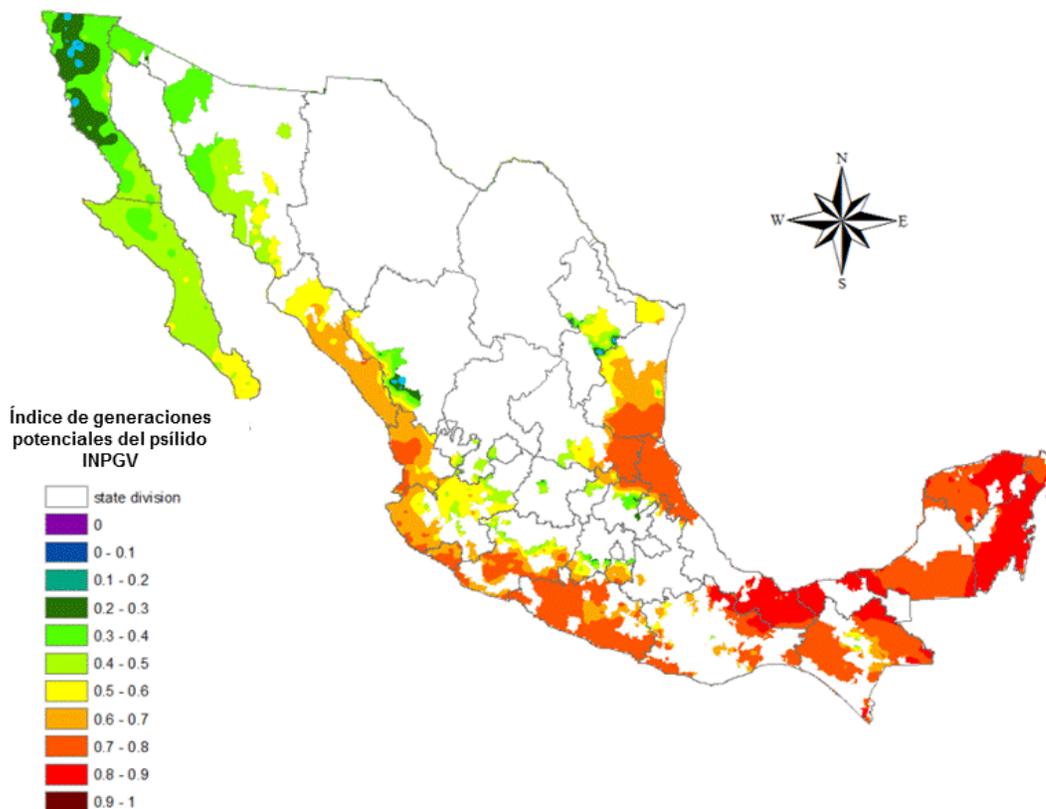


**Figura 4.13 Índice de condiciones favorables de temperatura para el desarrollo de *D. citri*.**

El índice *INPGV* representa el número de generaciones que el psílido puede completar en un año como proporción del máximo obtenido. En la Figura

4.6 se muestra este índice, observándose que las áreas en que se obtiene los más altos valores se ubican en los estados de Colima, Jalisco, Michoacán, Nayarit, Sinaloa, Tabasco, Veracruz y Yucatán. Esto es coincidente con los reportes de altas poblaciones de *D. citri* y las detecciones del HLB (Urías-López et al., 2011; Velázquez-Monreal et al., 2011; www.senasica.gob.mx).

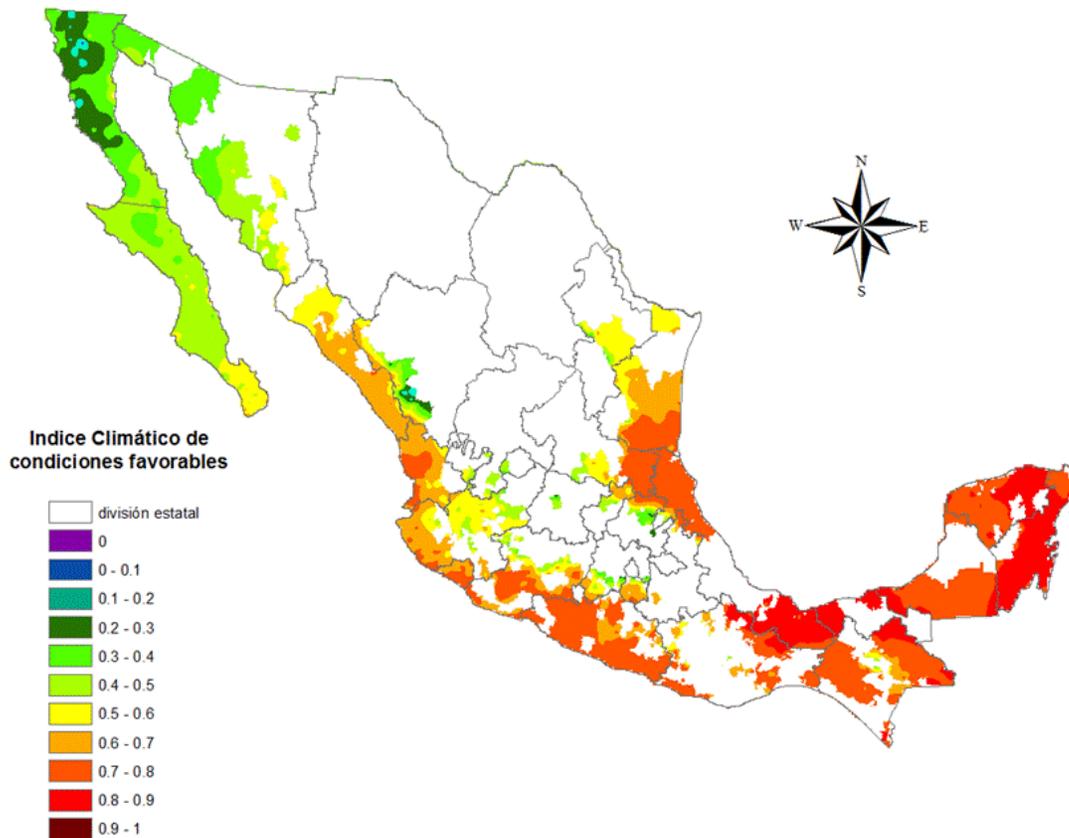
De las regiones donde aún no se ha detectado la presencia de la bacteria, la zona norte de Veracruz y el sur de Tamaulipas presentan las condiciones más favorables para la reproducción del insecto, con más de 11 generaciones potenciales por año (Figura 4.8). Esto indica que la región es favorable para la reproducción del psílido. La zona citrícola de Nuevo León tiene una clasificación de riesgo medio con 6 generaciones potenciales del psílido por año.



**Figura 4.14. Índice de generaciones potenciales de *D. citri* como proporción del máximo obtenido.**

En la Figura 4.9 se muestra la zonificación de las zonas citrícolas del país con base en el Índice integrado de Condiciones Agroclimáticas (*IICS*), el cual

representa el grado de coincidencia de las condiciones climáticas con los requerimientos para la producción de brotes vegetativos por parte del cítrico y para la reproducción y el desarrollo de las poblaciones del psílido. En el mapa resultante, las zonas de más alto riesgo se localizan en los estados de Campeche, Chiapas, Quintana Roo, Tabasco, Veracruz y Yucatán. En esas zonas, la mayor parte del año las condiciones son propicias para la presencia de brotes vegetativos y la reproducción del insecto. Estos resultados se confirman por los reportes de algunos estudios sobre abundancia poblacional de *D. citri* en Michoacán, Veracruz y Yucatán (Jasso-Argumedo et al., 2010; Miranda-Salcedo y López-Arroyo, 2010; Ortega-Arenas et al., 2010). En la región de “La Huasteca” (Tamaulipas, San Luis Potosí, Hidalgo y Veracruz), en Guerrero, Michoacán, Colima, y algunas zonas de Jalisco y Nayarit el índice alcanza valores de entre 0.7 y 0.8. El resto de las áreas de Jalisco, Nayarit, el centro de Tamaulipas y el estado de Sinaloa registran valores medios (0.6 a 0.7). En Nuevo León, Sonora y Baja California, la presencia de condiciones favorables para el desarrollo de *D. citri* puede considerarse como medio (<0.5) (Figura 4.15).

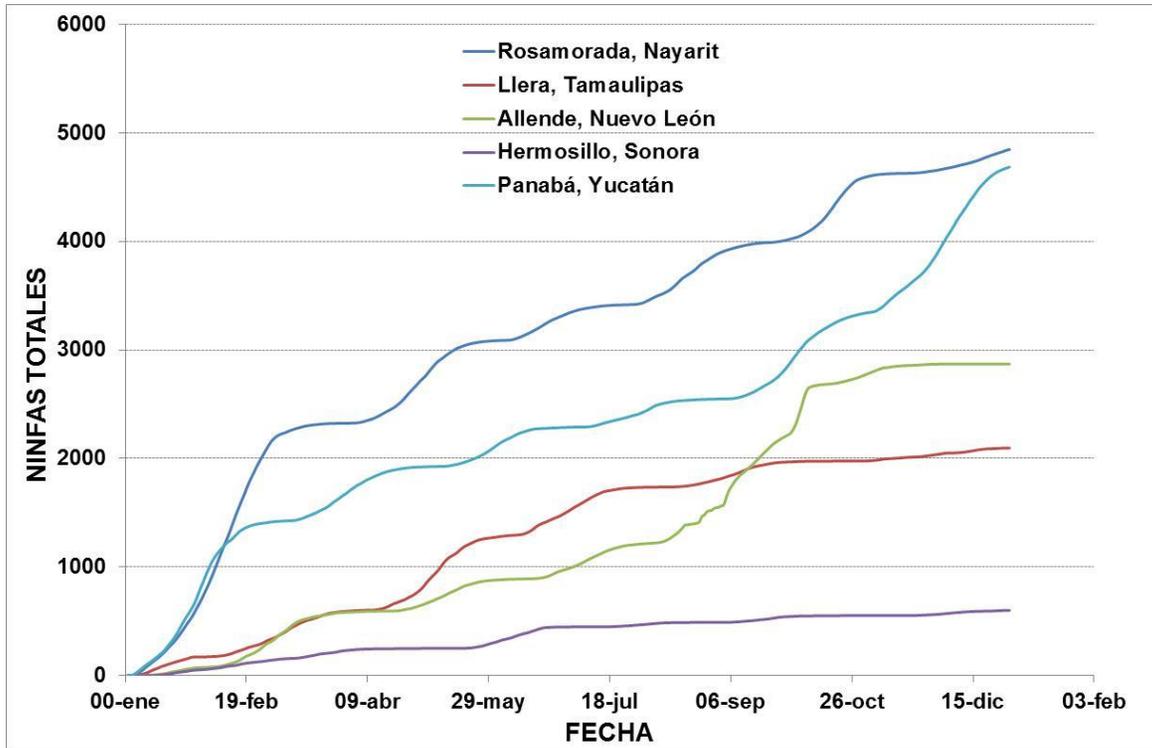


**Figura 4.15. Índice integrado de condiciones agroclimáticas favorables para la brotación de los cítricos y la reproducción de *D. citri*.**

**4.3.2. Simulación de la dinámica poblacional de *D. citri*.** Antes de realizar la simulación de la dinámica poblacional de *D. citri* para todas las estaciones del país, se evaluó la capacidad del modelo para representar las diferentes condiciones para su crecimiento en función del espacio y el tiempo.

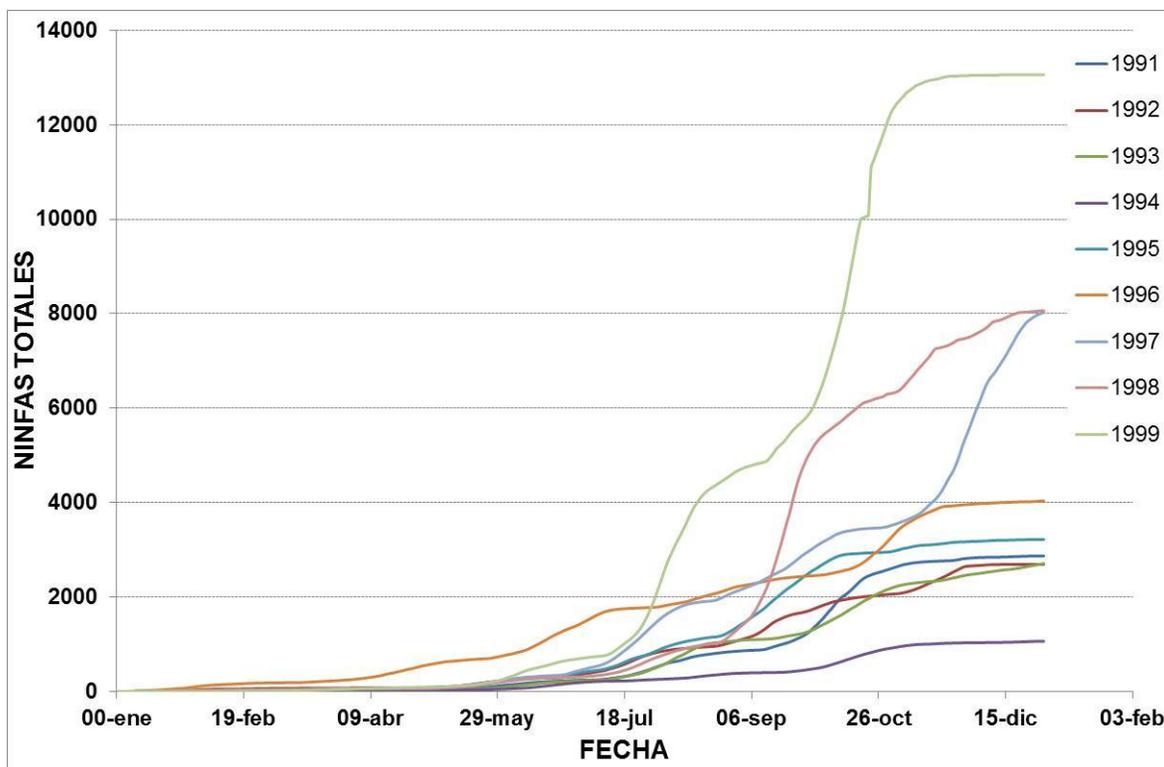
Para explorar la variación espacial se procedió a estimar la población de Ninfas por hectárea en 5 localidades ubicadas en zonas cítricas del país, Rosamorada, Nayarit; Llera, Tamaulipas; Allende, Nuevo León; Hermosillo, Sonora y Panabá, Yucatán (Figura 4.16). Con el fin de mantener fijo el tiempo todas las estaciones se corrieron con datos de clima del año 2000. Como se

puede apreciar, las localidades de Yucatán y Nayarit, representativas del clima tropical húmedo y subhúmedo, presentan una condición más favorable para el crecimiento del insecto en comparación con el clima semiseco de Nuevo León y Tamaulipas o el desértico de Sonora, donde la población de Ninfas de *D. citri* se mantiene en niveles bajos y con tendencia a la estabilidad.



**Figura 4.16. Dinámica poblacional simulada de *D. citri* en 5 localidades representativas de zonas citrícolas del país.**

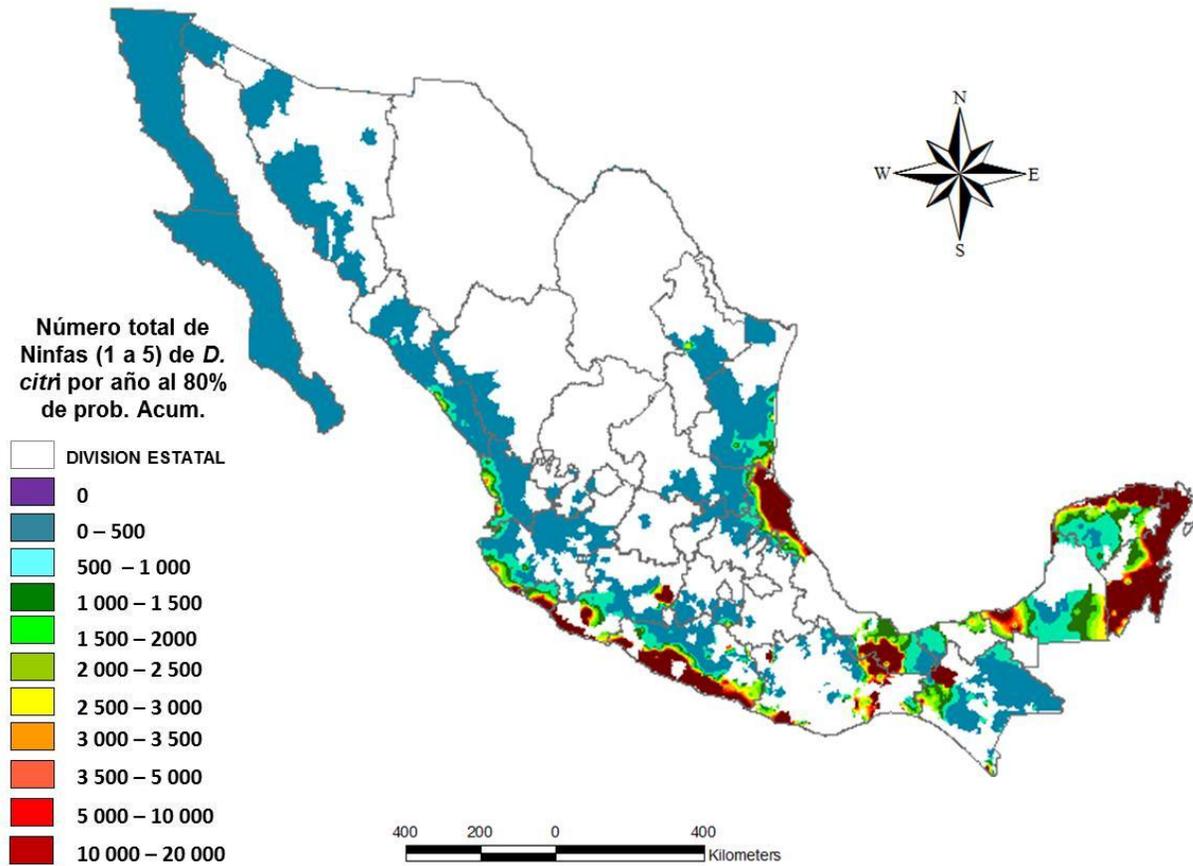
Para evaluar la sensibilidad del modelo a los cambios en las condiciones ambientales que son dependientes del tiempo se simuló el crecimiento de las Ninfas de *D. citri* en la localidad de Tamiahua, Veracruz de 1991 a 1999. En la Figura 4.11 se muestran los resultados de estas simulaciones.



**Figura 4.17. Dinámica poblacional simulada de *D. citri* en la localidad de Tamiahua, Veracruz en el período de 1991 a 1999.**

Los resultados muestran una gran variabilidad en la población total de Ninfas entre los años evaluados, desde menos de 2000 Ninfas totales en 1991 hasta más de 12000 en 1999. En 1997 y 1998 también se presenta una condición favorable para el insecto y la población de Ninfas alcanza un nivel de 8000 individuos. No hay una causa simple para explicar estas diferencias sino una serie de interacciones que han sido incluidas en la estructura del modelo y que permiten que éste sea sensible a la variación en los datos de entrada. Este aspecto representa una ventaja respecto al enfoque de índices agroclimáticos, ya que no solo se identifican los ambientes con condiciones favorables para el insecto, sino que se precisan los niveles de crecimiento poblacional del mismo.

En la Figura 4.18 se presenta el mapa con la clasificación de las zonas cítricas del país de acuerdo con los niveles poblacionales estimados para ninfas de *D. citri* al 80% de probabilidad acumulada.



**Figura 4.18. Niveles estimados del potencial de crecimiento poblacional de ninfas de *D. citri* en las diferentes regiones cítricas del país.**

Al igual que en el caso de los índices climáticos, las zonas con condiciones más favorables para el crecimiento de las poblaciones de *D. citri* se concentran en 4 zonas a saber: en el sureste, en las zonas costeras de Yucatán y Quintana Roo; en el Istmo de Tehuantepec, en los límites entre Veracruz y Oaxaca; en las costas de Michoacán y Colima y en el norte de Veracruz. La diferencia con el enfoque de índices radica en que estas zonas se delimitan de manera más precisa con respecto a sus áreas circundantes. Zonas importantes cítricas como “La

Huasteca Potosina”, Nuevo León, Sonora y la península de Baja California se ubican en un nivel de riesgo muy bajo al estimarse para estos estados poblaciones escasas del vector.

#### **4.3.3. Implicaciones para el Manejo de *D. citri* y el HLB**

En general, los mapas de riesgo basados en modelaje, proveen una base científica para decidir cómo distribuir los recursos para el monitoreo de las plagas. Este enfoque permite diseñar y operar estrategias regionales de monitoreo de especies invasivas, aprovechando la información agroclimática disponible para eficientar los recursos humanos y económicos.

Este estudio permitió comprobar que las zonas donde actualmente está presente el HLB en México coinciden con la presencia de las condiciones más favorables para la brotación continua de los cítricos y la reproducción del psílido.

En general estas áreas se clasifican como zonas Mega térmicas de trópico húmedo, de acuerdo a la clasificación de Köppen, lo cual también es coincidente con las detecciones del HLB reportadas en Brasil, Cuba y la Florida en los Estados Unidos de Norteamérica. El Norte de Veracruz, cerca de “La Huasteca” y el sur de Veracruz son las zonas con el más alto riesgo de infección por el HLB, debido a su similitud con las zonas actualmente infectadas en el país por este organismo (Figuras 3.5 y 4.18).

Estas zonas deberían considerarse como de la más alta prioridad para emprender acciones que prevengan el incremento de las poblaciones del psílido y por ende la dispersión de la bacteria en las huertas comerciales de naranja dulce y limón persa. La mayor parte de las zonas citrícolas que se encuentran actualmente libres del HLB presentan condiciones climáticas que podrían facilitar el Manejo del vector y la enfermedad, debido principalmente a que al restringirse los períodos de brotación a solo dos en el año, las poblaciones del psílido permanecen bajas la mayor parte del año.

El modelo obtenido mediante el presente estudio podrá contribuir a la planificación de estrategias regionales para el Manejo del complejo *D. citri*-HLB en México y se pone a la disposición del SENASICA como parte de los compromisos contraídos en el proyecto “Manejo de la enfermedad Huanglongbing (HLB) mediante el control de poblaciones del vector *Diaphorina citri* (Hemiptera: psyllidae), el psílido asiático de los cítricos” (108591), financiado por el Fondo SAGARPA-CONACYT.

## V. CONCLUSIONES.

Los datos analizados sugieren que el modelo de dinámica poblacional de *Diaphorina citri* Kuwayama representa de manera confiable los procesos de desarrollo y reproducción de este insecto y en tal sentido puede ser utilizado para apoyar estudios epidemiológicos y estrategias de manejo regional del vector. Es recomendable seguir probando su ajuste bajo otras condiciones climáticas y de hospedantes representativas de las diferentes zonas citrícolas del país.

Hay coincidencia en los resultados de la delimitación de zonas de riesgo al utilizar el enfoque de índices agroclimáticos y el modelaje de la dinámica poblacional del insecto, sin embargo, éste último permite definir con mayor precisión las zonas de más alto riesgo, además de que proporciona información sobre los procesos de reproducción y desarrollo del vector, la cual es útil para el manejo de las poblaciones del mismo.

De las zonas citrícolas que están actualmente libres del HLB, hay dos que deberían ser consideradas de la más alta prioridad en el control del vector, una es la zona ubicada en el norte de Veracruz, una de las más importantes zonas comerciales de producción de naranja dulce en el país y la otra ubicada al sur del mismo estado, en los límites con el estado de Oaxaca, también de importancia en la producción de naranja y limón persa.

Las zonas citrícolas de Baja California y Sonora representan un riesgo mínimo para la invasión del vector, dado que las condiciones climáticas no son propicias para su crecimiento acelerado.

## LITERATURA CITADA

- Aldama-Aguilera, C., L.A. Olvera-Vargas y M.G. Galindo-Mendoza. 2011. Reportes epidemiológicos de HLB. En: Memoria del 2° Simposio Nacional sobre investigación para el manejo del Psílido Asiático de los Cítricos y el Huanglongbing en México. Texcoco, México. p. 122-127.
- Aubert B. 1987. *Trioza erytrae* Del Guercio and *Diaphorina citri* Kuwayama (Homoptera: Psylloidea), the two vectors of citrus greening disease: Biological aspects and possible control strategies. *Fruits* 42:149-162.
- Bassanezi R.B. 2010. Epidemiology of Huanglongbing and its implications on disease management. In: Memoria del 2°. Taller Internacional sobre Huanglongbing de los cítricos (*Candidatus Liberibacter* spp) y el psílido asiático de los cítricos (*Diaphorina citri*). Hermosillo, Sonora, México. p. 37-43.
- Curti-Díaz, S.A., R.X. Loreda-Salazar, U. Díaz-Zorrilla, J.A. Sandoval y J. Hernández. 1996. Manual de producción de limón Persa. Folleto Técnico 14. INIFAP, Centro de Investigación Regional Golfo Centro, Campo Experimental Ixtacuaco. Tlapacoyán, Ver., México. 145 pp.
- Curti-Díaz, S.A., U. Díaz-Zorrilla, R.X. Loreda-Salazar, J.A. Sandoval, L. Pastrana y M. Rodríguez. 1998. Manual de producción de naranja para Veracruz y Tabasco. Libro Técnico No. 2. INIFAP, Centro de Investigación Regional Golfo Centro, Campos Experimentales Ixtacuaco y Huimanguillo, Veracruz y Tabasco, México. 175 pp.
- Da Graca, J.V. 1991. Citrus greening disease. *Annu. Rev. Phytopathol.* 29: 109-136.
- Da Graca, J.V., and L. Korsten. 2004. Citrus huanglongbing: Review, present status and future strategies, pp. 229-245. In: S.A.M.H. Naqvi (ed.) *Diseases of fruits and vegetables*, Vol. 1. Kluwer Academic Publishers. The Netherlands.
- Díaz P., G., G. Mora A., J.I. López A., R. Guajardo P. e I. Sánchez C. 2010. Modelación espacial de zonas de riesgo agroclimático para el desarrollo de

- Diaphorina citri* en zonas citrícolas del estado de Veracruz. Caso de estudio naranja. En: Memorias del XIV Simposio Internacional SELPER.
- Esquivel-Chávez, F., G. Valdovinos-Ponce, G. Mora-Aguilera, R. Gómez-Jaimes, J. Velázquez-Monreal, M.A. Manzanilla-Ramírez, J.L. Flores-Sánchez y J.I. López-Arroyo. 2012. Análisis Histológico en cítricos agrios y naranja dulce asociados a síntomas ocasionados por *Candidatus Liberibacter asiaticus*. Agrociencia. (Submitted).
- FOOD AND AGRICULTURAL ORGANIZATION. 1996. Agro-ecological zoning, Guidelines. FAO Soils Bulletin 73. Soil Resources, Management and Conservation Service. FAO Land and Water Development Division.
- Gutierrez, A.P., and L. Ponti. 2011. Assessing the invasive potential of the Mediterranean fruit fly in California and Italy. *Biol Invasions* 13: 1387-1402.
- Haefner, J. W. 2005. Modeling biological systems: principles and applications, (2nd. ed.) USA: Springer Science + Business Media Inc. (Chapters 1-4).
- Halbert, S. E., and K. L. Manjunath. 2004. Asian citrus psyllids (Sternorrhyncha: Psyllidae) and greening disease of citrus: A literature review and assessment of risk in Florida. *Florida Entomologist* 87(3):401-402.
- Hall, D.G., and L.G. Albrigo. 2007. Estimating the relative abundance of flush shoots in citrus, with implications on monitoring insects associated with flush. *HortScience* 42: 364-368.
- Hall, D.G., S.L. Lapointe, and E.K. Wenninger.. 2007. Effects of particle film on biology and behavior of *Diaphorina citri* (Hemiptera: Psyllidae) and its infestations in citrus. *J. Econ. Entomol.* 100: 847-854.
- Hall, D.G., E.J. Wenninger, and M.G. Hentz. 2011. Temperature studies with the Asian citrus psyllid, *Diaphorina citri*: Cold hardiness and temperature thresholds for oviposition. *Journal of Insect Science* 83:1-15.
- Hardy, S., and T. Khurshid. 2007. Calculating heat units for citrus. Primefacts, NSW department of primary industries, primefact 749.
- Hernández, Z. M.I. 2010. Influencia de la temperatura en el desarrollo de la palomilla de la papa (*Phthorimaea operculella* ZELLER) (Lepidóptera:

- Gelechiidae) bajo condiciones de laboratorio. Tesis de Maestría. Universidad de Guanajuato. Campus Irapuato-Salamanca. División de ciencias de la vida.
- Jasso-Argumedo, J., M. Lozano-Contreras, H. Barroso-Aké y J.I. López-Arroyo. 2010. Abundancia estacional de *Diaphorina citri* (Hemiptera: Psyllidae) y sus enemigos naturales en huertas de limón persa en Yucatán, México, pp. 311-318. In: J.I. López-Arroyo y V.W. González-Lauck (Comp.) Memorias del Primer Simposio Nacional sobre Investigación para el Manejo del Psílido Asiático de los Cítricos y el Huanglongbing y en México. 8-9 Diciembre de 2010. Monterrey, N.L., México.
- Ladányi, M., and L. Horváth. 2010. A review of the potential climate change impact on insect populations – General and agricultural aspects. *Appl Ecol Env Res* 8: 143-152.
- Liu, Y.H., and J.H. Tsai. 2000. Effects of temperature on biology and life table parameters of the Asian citrus psyllid, *Diaphorina citri* Kuwayama (Homoptera: Psyllidae). *Ann Appl Biol* 137: 201-206.
- López-Arroyo, J.I., J. Jasso, M.A. Reyes, J. Loera-Gallardo, E. Cortez-Mondaca y M.A. Miranda. 2009. Perspectives for biological control of *Diaphorina citri* (Hemiptera: Psyllidae) in Mexico, pp. 329-330. In: T.R. Gottwald and J.H. Graham Proceedings of the International Research Conference on Huanglongbing. Dec. 1-5, 2008. Orlando, Florida.
- Magarey, R.D., G.A. Fowler, D.M. Borchert, T.B. Sutton, M. Colunga-García, and J.A. Simpson. 2007. NAPPFAS: An internet system for the weather-based mapping of plant pathogens. *Plant Dis* 91: 336-345.
- Marco, V. 2001. Modelización de la tasa de desarrollo de insectos en función de la temperatura. Aplicación del manejo integrado de plagas mediante el método grados-día. *Entomología aplicada III. Aracnet 7-Bol. S.E.A., No. 28: 147-150.*
- Medina-Urrutia, V.M., M.M. Robles-González, S. Becerra-Rodríguez, J. Orozco-Romero, M. Orozco Santos, J.G. Garza-López, M.E. Ovando-Cruz y X. Chávez-Contreras. 2008. El cultivo de limón Mexicano. Libro Técnico Núm. 1. Campo Experimental Tecomán. INIFAP-SAGARPA. México. 188 pp.

- Michaud, J. P. 2004. Natural mortality of Asian citrus psyllid (Homoptera: Psyllidae) in central Florida. *Biological Control* 29 (2): 260-269.
- Miranda-Salcedo, M.A. y J.I. López-Arroyo. 2010. Fluctuación poblacional del psílido asiático de los cítricos *Diaphorina citri* KUWAYAMA (HEMIPTERA: PSYLLIDAE) y de sus enemigos naturales en Michoacán. En: Memoria del 1er. Simposio Nacional sobre investigación para el manejo del Psílido Asiático de los Cítricos y el Huanglongbing en México.
- Nava, D.E., M.L.G. Torres, M.D.L. Rodrigues, J.M.S. Bento, and J.R.P. Parra. 2007. Biology of *Diaphorina citri* (Hem., Psyllidae) on different hosts and at different temperatures. *J. Appl. Biol.* 131: 709-715.
- Ortega-Arenas, L.D., A. Villegas-Monter, N. Orduño-Cruz, J. Vega-Chávez, J.R. Lomelí-Flores y E. Rodríguez-Leyva. 2010. Fluctuación poblacional de *Diaphorina citri* y enemigos naturales asociados a especies de cítricos en Cazonas, Veracruz, México. Memoria del 1er. Simposio Nacional sobre investigación para el manejo del Psílido Asiático de los Cítricos y el Huanglongbing en México. 56 -63.
- Quijano-Carranza, J.A., J. López-Collado, L.A. Rodríguez-del-Bosque, M.I. Hernández-Zul y V. Palacios-Corona. 2010. Modelaje y Simulación. En Morón M.A. y L.A. Rodríguez-del-Bosque eds: *Plagas de Suelo*. México: Mundiprensa. (Capítulo 7).
- Quijano-Carranza J.A., R. Rocha-Rodríguez y J.A. Aguirre-Gómez. 2011. Sistema de Información para el Monitoreo del Potencial Ecológico de los Cultivos, SIMPEC. INIFAP-SAGARPA México. Publicación técnica no. 2, 32 p.
- Rafos, T. 2003. Spatial stochastic simulation offers potential as a quantitative method for pest risk analysis. *Risk Analysis* 23: 651-661.
- Robles-González, M.M., J.J. Velázquez-Monreal, M.A. Manzanilla-Ramírez, M. Orozco-Santos, R. Flores-Virgen y V.M. Medina-Urrutia. 2011. El HLB en árboles de limón mexicano [*Citrus aurantifolia* (Christm) Swingle] su dispersión y síntomas en Colima, México, pp. 43-53. In: López Arroyo, J.I., González Lauck, V.W. (Comp.). 2° Simposio Nacional sobre Investigación para el Manejo del Psílido Asiático de los Cítricos y el Huanglongbing en México,

- Montecillo, Edo. de México, México 5 y 6 de diciembre, 2011. ISBN 978-607-425-680-2. 424 p.
- Rocha, M.A. y J.E. Padrón. 2009. El cultivo de los cítricos en el Estado de Nuevo León. Libro científico no. 1. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. CIRNE. Campo Experimental Gral. Terán. México. 474 pp.
- Roistacher, C. N. 1991. Techniques for biological detection of specific citrus graft transmissible diseases, pp. 33-45 (greening). FAO. ROME.
- Rosa, G.S. M.I.S. Costa, J.E. Corrente, L.V.A. Silveira, and W.A.C. Godoy. 2011. Population dynamics, life stage and ecological modeling in *Chrysomya albiceps* (Wiedemann) (Diptera: Calliphoridae). Neotrop Entomol 40: 181-189.
- SERVICIO NACIONAL DE SANIDAD INOCUIDAD Y CALIDAD AGROALIMENTARIA. 2008. Manual técnico para la detección del Huanglongbing de los cítricos. Dirección General de Sanidad Vegetal. Dirección de Protección Fitosanitaria.
- SERVICIO NACIONAL DE SANIDAD INOCUIDAD Y CALIDAD AGROALIMENTARIA. 2012. Acciones contra el Huanglongbing y su vector en México. Informe del 02 de enero al 30 de junio de 2012. Dirección General de Sanidad Vegetal. Dirección de Protección Fitosanitaria.
- Sétamou, M., D. Flores, J.V. French, and D.G. Hall. 2008. Dispersion patterns and sampling plans for *Diaphorina citri* (Hemiptera: Psyllidae) in citrus. J. Econ. Entomol. 101(4): 1478-1487.
- Sutherst, R.W., G.F. Maywald, T. Yonow, and P.M. Stevens. 1999. CLIMEX: predicting the effects of climate on plants and animals. CLIMEX: predicting the effects of climate on plants and animals. Collingwood, Australia CSIRO Publishing iv + 88 pp.
- Thornley, J.H.M. and France, J. 2007. Mathematical models in agriculture. Quantitative methods for the plant, animal and ecological sciences. (2nd. ed.) UK: CABI Publishing, (Chapters 1, and 2).
- Trujillo-Arriaga, J., H.M. Sánchez-Anguiano y P.L. Robles-García. 2008. En Memoria del 1er. Taller Internacional sobre Huanglongbing de los cítricos

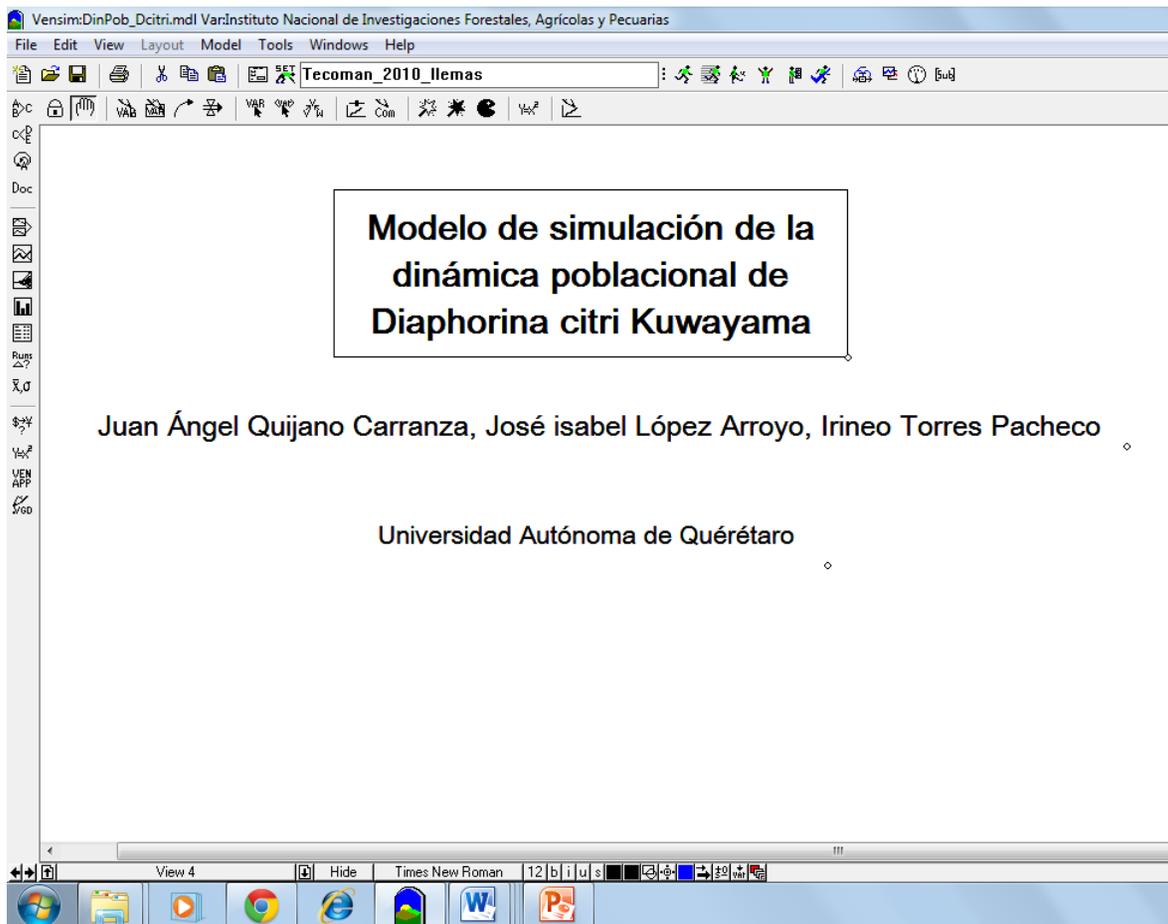
- (*Candidatus Liberibacter* spp) y el psílido asiático de los cítricos (*Diaphorina citri*). Hermosillo, Sonora, México.
- Trujillo-Arriaga, J. 2010. Situación actual, regulación y manejo del HLB en México. En Memoria del 2º. Taller Internacional sobre el Huanglongbing y el Psílido Asiático de los Cítricos. Mérida, Yucatán México.
- Tsai, H.T., J.J. Wang, and Y.H. Liu. 2002. Seasonal abundance of the Asian citrus psyllid *Diaphorina citri* (Homoptera: Psyllidae) in southern Florida. Fla. Entomol. 85: 446-451.
- Urías-López, M.A., L.M. Hernández-Fuentes, J.I. López-Arroyo y N.C. García-Álvarez. 2011. Distribución temporal y densidades de población del psílido asiático de los cítricos (Hemiptera: Psyllidae) en Nayarit, México, pp. 156-162. In: López Arroyo, J.I., González Lauck, V.W. (Comp.). 2º Simposio Nacional sobre Investigación para el Manejo del Psílido Asiático de los Cítricos y el Huanglongbing en México, Montecillo, Edo. de México, México. 5 y 6 de diciembre, 2011. ISBN 978-607-425-680-2. 424 p.
- Velázquez-Monreal, J.J., M.M. Robles-González, M.A. Manzanilla-Ramírez, S.H. Carrillo-Medrano y M. Orozco-Santos. 2011. Dinámica poblacional de *Diaphorina citri* Kuwayama (Hemiptera: Psyllidae), en el estado de Colima, pp. 161-168. In: López Arroyo, J.I., González Lauck, V.W. (Comp.). 2º Simposio Nacional sobre Investigación para el Manejo del Psílido Asiático de los Cítricos y el Huanglongbing en México, Montecillo, Edo. de México, México. 5 y 6 de diciembre, 2011. ISBN 978-607-425-680-2. 424 p.
- Wagner, T.L., H. Wu, P.J.H. Sharpe, R.M. Schoolfield, and R.N. Coulson. 1984. Modeling insect development rates: a literature review and application of a biophysical model. Ann. Entomol. Soc. Am., 77: 208-225.
- Zhao, X. 2010. Background, current situation and management of the HLB and its vector in China. En: Memoria del 2º. Taller Internacional sobre Huanglongbing de los cítricos (*Candidatus Liberibacter* spp) y el psílido asiático de los cítricos (*Diaphorina citri*). Hermosillo, Sonora, México. 44-52

# **APENDICE**

# Documentación del modelo de la dinámica poblacional de *Diaphorina citri* Kuwayama (DinPob\_Dcitra).

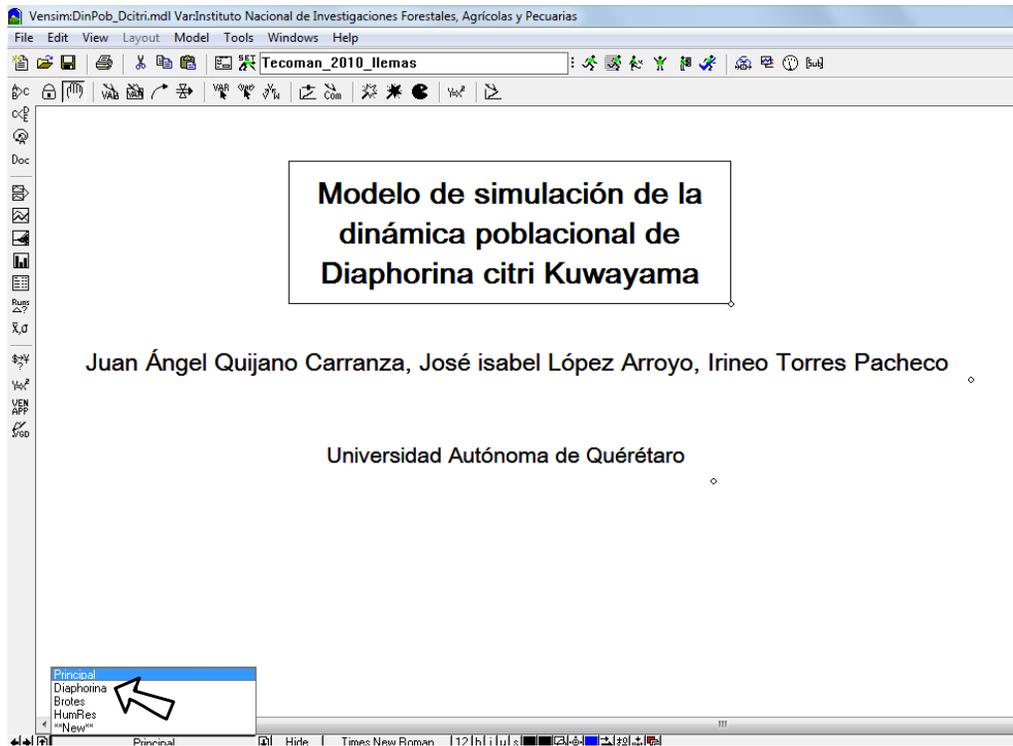
## 1. DESCRIPCIÓN DE PANTALLA.

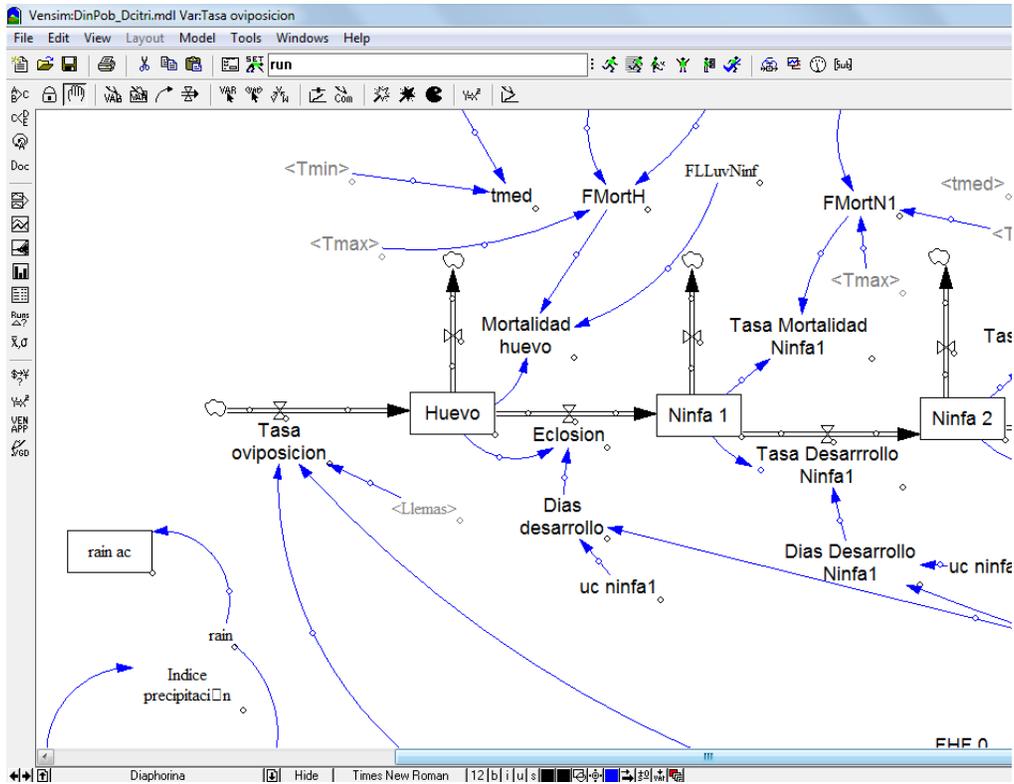
El modelo DinPob\_Dcitra requiere contar con el programa Vensim en versión Model Reader o Vensim PLE, las cuales son de distribución gratuita, o bien Vensim DSS en versión 4.2 o superior, la cual requiere la adquisición de una licencia. Para iniciar el programa se da doble click en el nombre del modelo DinPob\_Dcitra.vpm o DinPob\_Dcitra.mdl. Al abrir el modelo se presenta la pantalla siguiente:



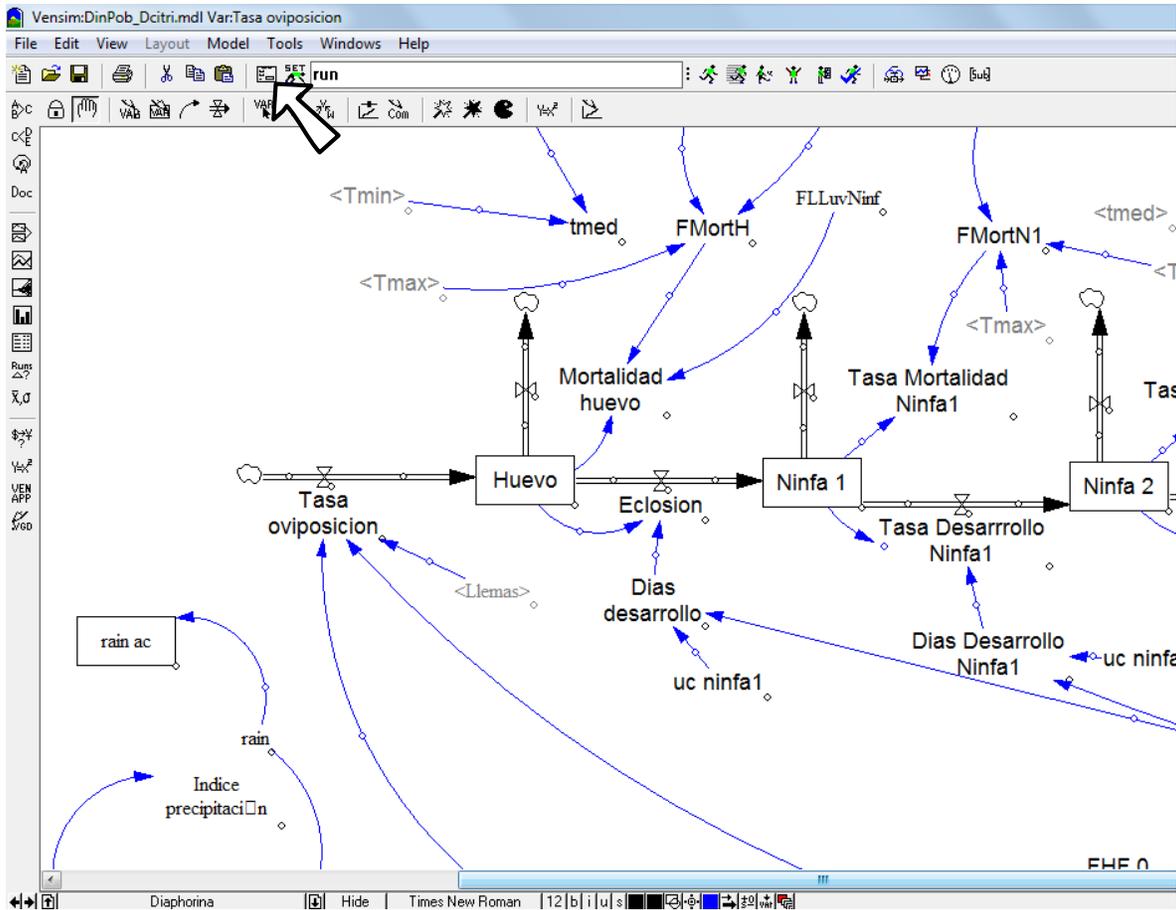
Esta pantalla permite explorar la estructura del modelo a través de las barras de desplazamiento horizontal y vertical, así como las vistas correspondientes a los diferentes módulos. Presionando sobre la barra inferior

izquierda, donde aparece la vista “Principal”, se despliegan las demás ventanas. Al dar un click sobre el módulo “*Diaphorina*” se cambia la vista al módulo correspondiente a la dinámica poblacional del insecto, como se muestra en las siguientes pantallas.

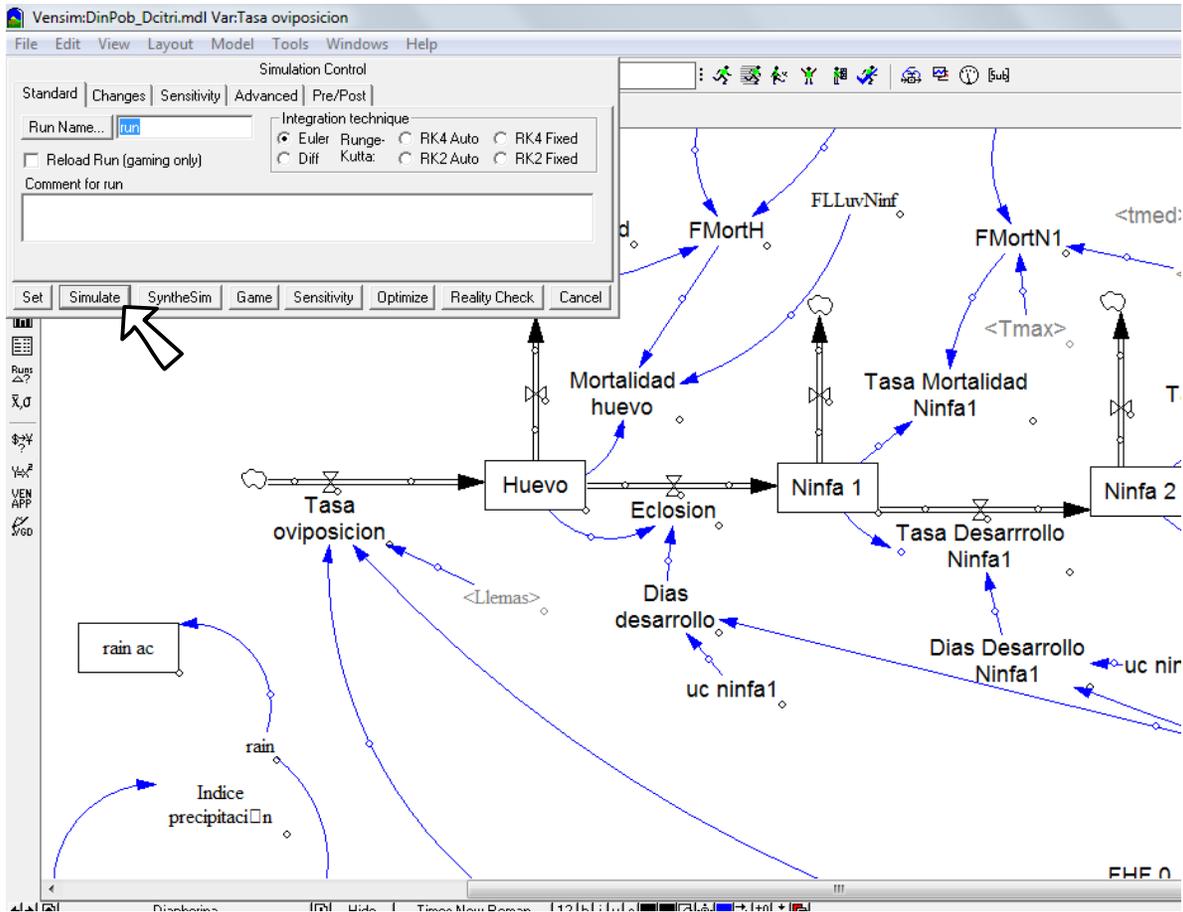




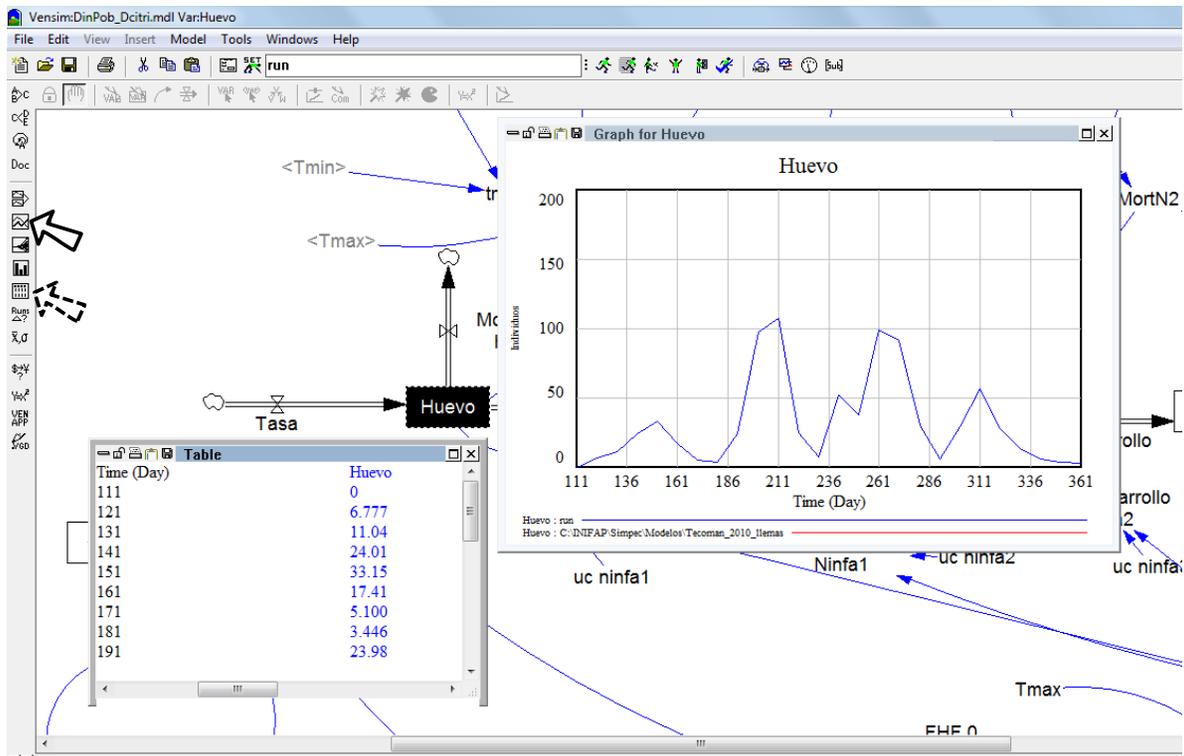
Para ejecutar el modelo se presiona el icono de control de simulación, el cual se encuentra ubicado en la barra de herramientas principal del programa. Al hacer lo anterior se abre el Cuadro de diálogo del Control de Simulación donde el usuario puede cambiar las constantes y valores iniciales del modelo, así como el archivo externo de datos de clima.



Antes de ejecutar la simulación, se asigna un nombre a la corrida en el espacio correspondiente a “Run name” y posteriormente se presiona el botón “Simulate” tal como se muestra en la pantalla siguiente:



Una vez ejecutada la simulación, los resultados se pueden revisar ya sea en forma de gráfica o de tabla, seleccionando antes la variable o grupo de variables que se desea analizar como se muestra en la pantalla siguiente:



Por default, el programa siempre muestra la evolución de las variables seleccionadas en función del tiempo. Los resultados tanto en formato de tabla como de gráfica se pueden exportar a una hoja de cálculo.

Las salidas más importantes de este modelo se relacionan con las variables que representan los diferentes estadios de vida del insecto, sin embargo, es posible analizar las más de 100 variables que lo componen.

## 2. CÓDIGO FUENTE DEL MODELO.

### 2.1 Unidades calor del cítrico y el psílido:

```
UCA cítricos= IF THEN ELSE(Llemas<1,-UCA cítricos,"UC cítricos/día") (°C)
UC cítricos/día= IF THEN ELSE ((Umax+Umin)/2<=TbaseDCitrico,0,((Umax+Umin)/2)-
TbaseDCitrico) (°C /día)
Crecimiento vegetativo= INTEG (IF THEN ELSE(Crecimiento vegetativo<490,"UC cítricos/día",-
Crecimiento vegetativo)\0)
TbaseDCitrico= 12.8 (°C)
UCA psílido= INTEG (UC psílido,0) (°C)
UC psílido= IF THEN ELSE ((Umax+Umin)/2<=Tbase psílido,0,((Umax+Umin)/2)-Tbase psílido)
(°C/día)
Umin=IF THEN ELSE(Tmin<0,0,Tmin) (°C /día)
Umax= IF THEN ELSE(Tmax>=36,36,Tmax) (°C /día)
```

### 2.2 Crecimiento de brotes tiernos (cítricos):

```
Llemas= INTEG (IF THEN ELSE(Llemas<1,80,"No. llemas"-Tasa brotes),80)
TllemOv([(0,0)-(80,1)],(0,0.05),(40,0.8),(80,1))
Brotes tiernos= INTEG (Tasa brotes-Tasa crecimeinto,0)
Brotes leñosos= INTEG (Tasa crecimeinto,0)
Tasa brotes=IF THEN ELSE(UCA cítricos>=260,Llemas*"UC cítricos/día"/140,0)
Tasa crecimiento=IF THEN ELSE(Brotes tiernos<=0,0,Brotes tiernos*("UC cítricos/día"/100))
"No. llemas"=0
FllemOvip=TllemOv(Llemas)
```

### 2.3 Humedad residual y Estación de crecimiento:

```
HUMRES= INTEG (IF THEN ELSE(HUMRES+rain-0.5*eto>61,0,Tasa llenado-Tasa vaciado),0)
Humres acotado 50=IF THEN ELSE(Acotado>0,HUMRES,IF THEN
ELSE(HUMRES>50,HUMRES,0))
Hum Res2 0= INTEG (IF THEN ELSE(Hum Res2 0>=70:AND:Balhum2 0>0, 0 , Balhum2 0), 0)
HUMRESb=IF THEN ELSE(Time<170, 20 , HUMRES )
Acotado= INTEG (IF THEN ELSE(HUMRES>=50:AND:dj>135,HUMRES,0), 0)
Tasa llenado=rain
Tasa vaciado=IF THEN ELSE(HUMRES>0:AND:Tasa vaciado 1=0,HUMRES,IF THEN ELSE
(HUMRES+Tasa llenado-eto*0.5<0,0,eto*0.5))
Tasa vaciado 1= IF THEN ELSE (HUMRES+Tasa llenado-eto*0.5<0,0,eto*0.5)
INICIO EC= INTEG (IF THEN ELSE(Time<90,1,IF THEN ELSE(Contador>0:OR:Time>INICIO
EC,0,1)), 0)
FIN EC= INTEG ( IF THEN ELSE(FIN EC<Time,0,IF THEN
ELSE(Contador>0:OR:Time>INICIO EC,Contador,1)),0)
FIN EC 0= INTEG ( IF THEN ELSE(FIN EC 0<Time,0,IF THEN ELSE(Time>INICIO
EC,Contador,1)),0)
FIN EC 0 0= INTEG (IF THEN ELSE(FIN EC 0 0<Time,0, IF THEN ELSE(Time=INICIO
EC,1,Contador)),0)
TOTAL DIAS EC=(FIN EC)-INICIO EC
eto=evapeq*1.1
evapeq=SRAD*(0.00488-0.00437*albedo)*(tprom+29)
RADT=15.5076+0.215665*Time-0.000740701*Time^2+4.06658e-007*Time^3
~ DIMENSIONLESS
"n/N"= 0.0729329+0.0395636*Tmax-0.0373314*Tmin
SRAD=RADT*(0.18+(0.55*"n/N"))
tprom= Tmax*0.6+Tmin*0.4
alb1=0.1*EXP(-0.7*IAF)
alb2=0.2*(1-EXP(-0.7*IAF))
```

albedo=alb1+alb2  
 IAF=Tabla IAF(HUMRES)  
 Tabla IAF([(0,0)-(400,10)],(0,4),(1,4),(10,5),(20,5),(30,5),(50,5),(70,6),(100,6),(200,5),(300,4),(360,2))  
 Emax=eto\*EXP(-0.4\*IAF)  
 Balhum2 0=IF THEN ELSE(Hum Res2 0>=0:AND:Balhum3 0>0, Balhum3 0 , IF THEN ELSE( Hum Res2 0=0 :AND:\Balhum3 0<0, 0 , IF THEN ELSE(Hum Res2 0>0:AND:Balhum3 0<0:AND:Hum Res2 0>ABS(Balhum3 0), Balhum3 0 , IF THEN ELSE(Hum Res2 0>0:AND:Balhum3 0<0:AND:Hum Res2 0<ABS(Balhum3 0), -Hum Res2 0 , 0 ) ) ) )  
 Balhum3 0=rain-0.5\*eto  
 dj= INTEG (IF THEN ELSE(dj=365,-364, IF THEN ELSE(dj>365,0/dj,1)),0)  
 ~ DIMENSIONLESS (Dmnl)  
 ~ DIMENSIONLESS  
 Contador=IF THEN ELSE(HELADA=100,0,IF THEN ELSE(Humres acotado 50>0,1,0))  
 CONTADOR DIAS= INTEG (IF THEN ELSE(Contador=0,-CONTADOR DIAS,Contador),0)  
 HELADA= INTEG (IF THEN ELSE(Tmin<2:AND:Acotado>0,100,0), 0)  
 Indice precipitación=IF THEN ELSE(Dias consec lluvia>=2, 0 , 1 )  
 Dias consec lluvia= INTEG (IF THEN ELSE(Dias consec lluvia>0, IF THEN ELSE(rain<=0, -Dias consec lluvia , IF THEN ELSE(rain>0, 1 , 0 ) ) , 1 ),0)  
 rain ac= INTEG (rain,0)

## 2.4 Oviposición:

Huevo= INTEG ( Tasa oviposicion-Ecllosion-Mortalidad huevo,0)  
 ~ Individuos  
 Tasa oviposicion=IF THEN ELSE(Llemas<=0,0 , Huevos por día\*Hembras fertiles)  
 ~ Individuos/Day  
 Mortalidad huevo=(Huevo\*FMortH)+(Huevo\*0.3\*FLLuvNinf)  
 ~ Individuos/Day  
 ~ +(Huevo\*0.6\*FLLuvNinf)  
 Huevos por día=(FHuevo/FLongevidadAdulto)  
 ~ Individuos/Day  
 ~ IF THEN ELSE(Indice brotación<=0,0 , min(Huevos por día\*Hembras fertiles,Brot \obs\*40 ) )  
 FHF 0=0.5  
 ~ Dmnl  
 FHumOvip=ThumOv(HUMRESb)  
 ThumOv([(0,0)-(80,1)],(0,0.3),(10,0.4),(30,1),(50,0.8),(60,0.3),(70,0.2))  
 FMortH=TMortH(Tmin)+TMortH(Tmax)  
 ~ Dmnl/Day  
 Fracción mortalidad huevecillos en función de temperatura  
 TMortH([(-40,0)-(60,1)],(-7.5,1),(0,0.667),(2.56881,0.367),(15,0.155),(20,0.106),(25,0.045)\ , (28,0.038),(30,0.068),(35,0.368),(48,1))  
 ~ Dmnl/Day  
 ~ Tabla fraccion Mortalidad deHuevecillos\\!\!\!  
 FHuevo=HHD\*FHumOvip\*FlemOvip  
 THuevo(Time)  
 Hembras fertiles=Adultos\*FHF 0  
 ~ Individuos  
 THuevo([(0,0)-(40,800)],(10,100),(15,171),(20,494),(25,626),(28,748),(30,316),(33,67))  
 ~ Individuos  
 ~ Total de huevecillos puestos durante el periodo de vida de la hembra en \Función de la temperatura.  
 HHD=800  
 ~ Individuos  
 indice brotacion=IF THEN ELSE(Brotos tiernos<10,0,1)

Dmnl

## 2.5 Dinámica poblacional de *Diaphorina citri*:

Ninfa 1= INTEG (Eclosion-Tasa Desarrollo Ninfa1-Tasa Mortalidad Ninfa1,3)  
~ Individuos

Ninfa 2= INTEG (Tasa Desarrollo Ninfa1-Tasa desarrollo Ninfa2-Tasa Mortalidad Ninfa2,2)  
~ Individuos

Ninfa 3= INTEG (Tasa desarrollo Ninfa2-Tasa Desarrollo Ninfa 3-Tasa Mortalidad Ninfa3,2)  
~ Individuos

ninfa 4= INTEG (Tasa Desarrollo Ninfa 3-Tasa Desarrollo Ninfa4-Tasa Mortalidadt Ninfa4,0)  
~ Individuos

Ninfa 5= INTEG (Tasa Desarrollo Ninfa4-Tasa Desarrollo Ninfa5-Tasa Mortalidad Ninfa5, 0)  
~ Individuos

Adultos= INTEG (inmig+Tasa Desarrollo Ninfa5-Tasa Mortalidad Adultos-Migración,0)  
~ Individuos

inmig=Img  
~ Individuos/Día

Migración=Adultos\*Mig  
~ Individuos/Día

FLLuvNinf=IF THEN ELSE(rain>=20, 1 , 0 )  
~ Dmnl

Img=IF THEN ELSE(HUMRESb<=50, IF THEN ELSE(Llemas>30, 0 , 0 ) , 0 )  
~ Individuos/Día  
~ Individuos/Día

Mig=(IF THEN ELSE(Adultos>=8, 0.15 , 0 )+IF THEN ELSE(Dias consec lluvia>=5, 0.5 , 0 ))  
~ Individuos/Día

Inmaduros=Ninfa 1+Ninfa 2  
~ Individuos/Día

Ninfa grande=ninfa 4+Ninfa 5  
~ Individuos/Día

ninfas totales=Ninfa chica+Ninfa grande  
~ Individuos/Día

Ninfa chica=Ninfa 1+Ninfa 2+Ninfa 3  
~ Individuos/Día

FMortN4=TMortN4(Tmax)+TMortN4(Tmin)  
~ Dmnl/Día  
~ Fracción mortalidad ninfa 4 en función de Temperatura

Tasa Mortalidad Adultos=(fraccion mortalidad adulto\*Adultos)  
~ Individuos/Día

Tasa Mortalidad Ninfa1=(Ninfa 1\*FMortN1)  
~ Individuos/Día  
~ +(Ninfa 1\*0.6\*FLLuvNinf)

Tasa Mortalidad Ninfa2=(Ninfa 2\*FMortN2)  
~ Individuos/Día  
~ +(Ninfa 2\*0.6\*FLLuvNinf)

Tasa Mortalidad Ninfa3=(Ninfa 3\*FMortN3)  
~ Individuos/Día  
~ +(Ninfa 3\*0.6\*FLLuvNinf)

Tasa Mortalidad Ninfa5=FMortN5\*Ninfa 5  
~ Individuos/Día

Tasa Mortalidadt Ninfa4=FMortN4\*ninfa 4  
~ Individuos/Día

TMortN1([(-8,0)-(60,1)],(-7.5,1),(2.56881,0.517544),(15,0.161),(20,0.146),(25,0.128),(28,0.06\),  
(30,0.089),(35,0.089),(48,1))  
~ Dmnl/Día

```

~ Tabla fraccion Mortalidad de ninfa 1!!!
FLongevidadAdulto=TLongevidadAdulto(tmed)
FMortN1=TMortN1(Tmin)+TMortN1(Tmax)
~ Dmnl/Día
~ Fracción mortalidad ninfa 1 en función de temperatura
FMortN2=TMortN2(Tmin)+TMortN2(Tmax)
~ Dmnl/Día
~ Fracción mortalidad ninfa 2 en función de Temperatura
FMortN3=TMortN3(Tmin)+TMortN3(Tmax)
~ Dmnl/Día
~ Fracción mortalidad ninfa 3 en función de Temperatura
FMortN5=TMortN5(Tmin)+TMortN5(Tmax)
~ Dmnl/Día
~ Fracción mortalidad ninfa 5 en función de Temperatura
TMortN2([(-8,0)-(60,1)],(-7.5,1),(2.56881,0.517544),(15,0.078),(20,0.061),(25,0.032),(28,0.038\
),(30,0.04),(35,0.04),(48,1))
~ Dmnl/Día
~ Tabla fraccion Mortalidad de ninfa 2!!!
TMortN3([(-8,0)-(60,1)],(-7.5,1),(2.56881,0.517544),(15,0.014),(20,0.006),(25,0.03),(28,0.006\
),(30,0.023),(35,0.023),(48,1))
~ Dmnl/Día
~ Tabla fraccion Mortalidad de ninfa 3!!!
~ *Brot obs*Indice precipitacion
TMortN4([(-8,0)-(60,1)],(-7.5,1),(2.56881,0.517544),(15,0.05),(20,0.06),(25,0.06),(28,0.09)\
(30,0.09),(35,0.09),(48,1))
~ Dmnl/Día
~ Tabla fraccion Mortalidad de ninfa 4!!!
TMortN5([(-8,0)-(60,1)],(-7.5,1),(2.56881,0.517544),(15,0.035),(20,0.013),(25,0.03),(28,0.013\
),(30,0.035),(35,0.035),(58,1))
~ Dmnl/Día
~ Tabla fraccion Mortalidad de ninfa 5!!!
TLongevidadAdulto([(0,0)-(40,200)],(10,97.3684),(15,88.3),(20,50.6),(25,39.7),(28,33.5),(30,28.7))
~ Días
~ Longevidad del adulto en días de acuerdo a (Liu and Tsai, 2000) en función \
de la temperatura.!!!
tmed=(Tmax-Tmin)/2
~ °C
Dias desarrollo=IF THEN ELSE(UC<=0,0,(1/(uc ninfa1/UC)))
~ Días
UC=IF THEN ELSE ((Umax+Umin)/2<=TbaseD,0,((Umax+Umin)/2)-TbaseD)
~ °C/Día
TbaseD=10.45
~ °C/día
fraccion mortalidad adulto= 0.01
~ 1/Día
Dias Desarrollo Ninfa1=IF THEN ELSE(UC<=0,0,(1/(uc ninfa2/UC)))
~ Días
Dias Desarrollo Ninfa2=IF THEN ELSE(UC<=0,0,(1/(uc ninfa3/UC)))
~ Días
Dias Desarrollo Ninfa3=IF THEN ELSE(UC<=0,0,(1/(uc ninfa4/UC)))
~ Días
Dias Desarrollo Ninfa4=IF THEN ELSE(UC<=0,0,(1/(uc ninfa5/UC)))
~ Días
Dias Desarrollo Ninfa5=IF THEN ELSE(UC<=0,0,(1/(uc adulto/UC)))
~ Días
uc adulto=63.29

```

~ °C  
 ~ grados-día necesarios para *D. citri* (N5-Adulto)  
 Eclosion=Huevo\*Dias desarrollo  
 ~ Individuos/Día  
 uc ninfa4=30.17  
 ~ °C  
 ~ grados-día necesarios para *D. citri* (N3-N4)  
 Tasa Desarrollo Ninfa 3=Ninfa 3\*Dias Desarrollo Ninfa3  
 ~ Individuos/Día  
 Tasa Desarrollo Ninfa4=ninfa 4\*Dias Desarrollo Ninfa4  
 ~ Individuos/Día  
 Tasa Desarrollo Ninfa5=Ninfa 5\*Dias Desarrollo Ninfa5  
 ~ Individuos/Día  
 uc ninfa2=26.46  
 ~ °C  
 ~ grados-día necesarios para *D. citri* (N1-N2)  
 uc ninfa3=24.1  
 ~ °C  
 ~ grados-día necesarios para *D. citri* (N2-N3)  
 uc ninfa5=38.76  
 ~ °C  
 ~ grados-día necesarios para *D. citri* (N4-N5)  
 Tasa desarrollo Ninfa2= Ninfa 2\*Dias Desarrollo Ninfa2  
 ~ Individuos/Día  
 uc ninfa1=67.57  
 ~ °C  
 ~ grados-día necesarios para *D. citri* (Huevo-N1)  
 tabla mort Hue([(0,0)-(2,0.04)],(0.1,0.03),(0.2,0.03),(0.3,0.02),(0.4,0.01),(0.5,0.009),(0.6,0.009)\  
 ,(0.8,0),(0.95,0),(1,0.03),(1.1,0.03))  
 ~ Dmnl  
 Tasa Desarrollo Ninfa1=Ninfa 1\*Dias Desarrollo Ninfa1  
 ~ Individuos/Día

## 2.6 Variables alimentadas externamente al modelo:

Estas variables se incluyen en un archivo con formato .vdf (vensim data format), el cual se elabora a partir de un archivo de hoja de cálculo.

Rain (Precipitación diaria)	mm
Tmax (Temperatura máxima diaria)	°C
Tmin (Temperatura mínima diaria)	°C

## 2.7 Constantes de control de la simulación:

FINAL TIME = 365	Día juliano
~	Tiempo de finalización de la simulación.
INITIAL TIME = 111	Día Juliano
~	Tiempo de inicio de la simulación
SAVEPER = 1	Días
~	Frecuencia con la cual se almacenan las salidas del modelo.
TIME STEP = 1	Días
~	Paso de tiempo de la simulación (dt)

### 3. DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LA FUNCIONALIDAD DEL MODELO.

El Modelo de simulación DinPob\_DCitri.mdl está construido en la plataforma Vensim versión 5.6d. El programa o algoritmo computacional consiste en un sistema de ecuaciones de integración numérica, resuelto mediante el método de integración de Euler. Este modelo calcula de manera diaria, el crecimiento y desarrollo de la población de insectos de *Diaphorina citri* Kuwayama, el cual es vector de la enfermedad HLB o amarillamiento de los cítricos. El modelo inicia los cálculos a partir de una población inicial de huevecillos que el usuario define ya sea basado en su propia experiencia o en datos de muestreo. Se asume que la dinámica poblacional de este insecto ocurre dentro de una huerta de cítricos cuya dimensión es de una hectárea y cuenta aproximadamente con 300 árboles. Para su funcionamiento, el modelo requiere ser alimentado con datos diarios de las variables meteorológicas Temperatura máxima, Temperatura mínima y Precipitación. Estas variables se incluyen en un archivo de datos con formato .vdf (Vensim data format), que es externo al modelo y se puede cambiar para representar condiciones correspondientes a diferentes años o localidades. El archivo externo se prepara a partir de datos en formato de texto o de hoja de cálculo.

El modelo está construido en forma modular e incluye los componentes de a) Dinámica poblacional del insecto; b) Disponibilidad de Humedad para el cítrico y c) Desarrollo y crecimiento de brotes vegetativos en el cítrico. El módulo de disponibilidad de humedad permite determinar si existen condiciones para la emisión de brotes vegetativos por parte del cítrico, lo cual a su vez es condición para que el insecto vector oviposite en los brotes tiernos del árbol iniciando así el ciclo de vida del insecto.

La innovación consiste en que el modelo desarrollado representa de manera única la interacción entre el clima, el árbol de cítrico y el insecto plaga, lo cual permite calcular la cantidad de individuos de las diferentes fases de vida del

insecto y los momentos precisos en que esos estadios fenológicos ocurrirán. Esta información es de gran valor para apoyar las estrategias de control de esta plaga.

#### **4. DATOS INICIALES.**

Las constantes que se pueden cambiar en el modelo para evaluar su efecto en el comportamiento de las poblaciones del insecto, así como sus valores iniciales se muestran a continuación:

UC ACUM=0  
UCA cítricos=0  
Llemas=80  
Brotos tiernos=0  
Brotos leñosos=0  
HUMRES=0  
Hum Res2 0=0  
rain ac=0  
Días consec lluvia=0  
dj=1  
Huevo=120  
Ninfa 1=0  
Ninfa2=0  
Ninfa 3=0  
Ninfa 4=0  
Ninfa 5=0  
Adultos=200

Los valores correspondientes a las poblaciones iniciales del insecto, pueden cambiarse si se cuenta con datos de muestreo. En este caso se asume que se parte de una situación en la que únicamente están presentes Huevo y Adulto.