

## Áreas de abundancia potencial en México del vector del Huanglongbing, *Diaphorina citri* (Hemiptera: Liviidae)\*

### Areas of potential abundance of *Diaphorina citri* (Hemiptera: Liviidae), vector of the citrus greening disease in Mexico

Gabriel Díaz-Padilla<sup>1§</sup>, J. Isabel López-Arroyo<sup>2</sup>, Ignacio Sánchez-Cohen<sup>3</sup>, Rafael Alberto Guajardo-Panes<sup>4</sup>, Gustavo Mora-Aguilera<sup>5</sup> y Juan Ángel Quijano-Carranza<sup>6</sup>

<sup>1</sup>INIFAP-Sitio Experimental Teocelo. Carretera Xalapa-Veracruz km. 3.5 (Edificio SAGARPA), Colonia Ánimas; C. P. 91190, Xalapa, Veracruz. (228) 812 5744. <sup>2</sup>INIFAP-Campo Experimental General Terán. Carretera Montemorelos-China km. 31, Col. Ex Hacienda las Anacuas, C. P. 67413, General Terán, Nuevo León. (826) 267 0260. (lopez.jose@inifap.gob.mx). <sup>3</sup>INIFAP-CENID-Relación Agua, Suelo, Planta, Atmósfera. km 6.5 margen derecha canal Sacramento. C. P. 35140. Gómez Palacio, Durango. (871) 159 0104. (sanchez.ignacio@inifap.gob.mx). <sup>4</sup>INIFAP-Sitio Experimental Teocelo. Carretera Xalapa-Veracruz km 3.5 (Edificio SAGARPA); Colonia Ánimas; C. P. 91190, Xalapa, Veracruz. (228) 812 5744. (guajardo.rafael@inifap.gob.mx). <sup>5</sup>Colegio de Postgraduados. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillos, Texcoco. C. P. 56230. Estado de México. (morag@colpos.mx). <sup>6</sup>INIFAP-Campo Experimental Bajío, km 6.5 Carretera Celaya-San Miguel de Allende S/N, Celaya, Guanajuato. (461) 611 5323. (quijano.juanangel@inifap.gob.mx). <sup>§</sup>Autora para correspondencia: diaz.gabriel@inifap.gob.mx.

## Resumen

La presencia de Huanglongbing y su vector: *Diaphorina citri* Kuwayama (Hemiptera: Liviidae) en México, aunado a la gran dispersión de la citricultura, dificultan su detección, control y manejo. Con el propósito de generar herramientas que faciliten la aplicación de estrategias para confrontar la problemática asociada al Huanglongbing y su vector, el presente estudio se desarrolló con el objetivo de implementar una metodología práctica y de uso sencillo para clasificar la presencia y abundancia potencial del vector y generar un mapa con la delimitación de las zonas potenciales de riesgo de desarrollo del insecto en el país. Se modelaron tres índices, dos basados en la temperatura (índice de generaciones potenciales, y días con condiciones favorables), y uno en la disponibilidad del hospedero (superficie plantada con cítricos). En el mapa final, cada índice fue ponderado respecto a su máximo, interpolado mediante el método de inverso de la distancia optimizado, y promediado con los demás para obtener el índice de riesgo promedio. Se encontró que los municipios con mayor índice de días con condiciones favorables fueron: Tuzantán, Chiapas, y Atoyac de Álvarez, Guerrero. Referente al índice de generaciones potenciales, los municipios de Rosario,

## Abstract

The presence of the citrus greening disease (HLB) and its vector: *Diaphorina citri* Kuwayama (Hemiptera: Liviidae) in Mexico, coupled with the large spread of the citrus industry, impede the detection, control and management. In order to generate tools that facilitate the implementation of strategies to confront the problems associated with HLB and its vector, this study was developed with the goal of implementing a practical and easy way to use a methodology for classifying the presence and potential of vector abundance and generate a map, showing the delineation of potential risk areas within the country. Three indices were modeled, two temperature-based (index of potential generations, IGP, and days with favorable conditions, IDCF), and another one on the availability of the host (citrus plantings, ISPC). On the final map, each index was weighted with respect to its maximum, interpolated using the inverse distance optimized method and averaged with others for the Egalitarian Risk Index (IRPM). We found that, the municipalities with the highest IDCF were Tuzantán, Chiapas, and Atoyac de Álvarez, Guerrero. Concerning IGP, the municipalities

\* Recibido: febrero de 2014  
Aceptado: julio de 2014

Sonora, y Pichucalco, Chiapas, resultaron con 34 y 28 generaciones potenciales anuales, respectivamente. El máximo riesgo, índice de riesgo promedio, se encontró en los municipios de Álamo Temapache, Martínez de la Torre, y Papantla, Veracruz, y Atoyac de Álvarez, Guerrero. El método propuesto es práctico, económico y sin cálculos complicados; para mejorarlo, sería necesario incorporar información de humedad relativa, precipitación, fenología y especie de cítricos. Su utilidad radica en que auxilia en la toma de decisiones relacionadas con acciones de detección, monitoreo, muestreo y control del vector.

**Palabras clave:** Huanglongbing, sistemas de información geográfica, interpolación, riesgo.

## Introducción

La citricultura mundial se encuentra bajo una seria amenaza por la ocurrencia del Huanglongbing (HLB), la enfermedad más devastadora de los cítricos a nivel global (da Graca, 1991; Bové y Garnier, 2002; da Graca y Korsten, 2004; Bové, 2006), incluso superior en importancia a la tristeza de los cítricos (Virus Tristeza de los Cítricos), cuyos efectos catastróficos causaron la muerte de más de 116 millones de árboles de cítricos en el mundo (Roistacher y Bar-Joseph 1987; Rocha-Peña *et al.* 1995; Román *et al.*, 2004). La primera detección de HLB en el Continente Americano fue en el año 2004, en el estado de Sao Paulo, Brasil. Desde su confirmación en Florida, E.U.A., en 2005, la dispersión de la enfermedad y su vector a través del Caribe, América Central y del Norte, ha sido considerablemente rápida (Gottwald *et al.*, 2007; National Research Council. 2010). Las pérdidas por efectos de esta enfermedad son cuantiosas; tan solo en África y Asia, causó la muerte de 60 millones de árboles (da Graca y Korsten, 2004; Thohirah *et al.*, 2009); en Sao Paulo, Brasil, en el período de 2005-2013 fue responsable de la eliminación de aproximadamente 35 millones de árboles (Portal Frutícola, 2014). En México, a través de acciones emprendidas en la Campaña Fitosanitaria de Prioridad Nacional contra el HLB, se detectó por primera vez en julio de 2009, en árboles de traspatio del Municipio de Tizimín, Yucatán; actualmente, la enfermedad ha sido detectada en 14 de los 23 estados citrícolas del país (SENASICA, 2014).

El impacto económico y social estimado del HLB, a tres años de establecido, en un escenario de alta presencia en México, sería la pérdida de 1.7 millones de toneladas y

of Rosario, Sonora, and Pichucalco, Chiapas, presented 34 and 28 potential generations per year respectively. The maximum risk, IRPM, was found in the municipalities of Alamo Temapache, Martínez de la Torre, and Papantla, Veracruz, and Atoyac de Álvarez, Guerrero. The proposed method is practical, cheap and without complicated calculations; for improving it, it would be necessary to incorporate information regarding relative humidity, rainfall, phenology and species of citrus. Its usefulness lies by helping for decision making about actions for detection, monitoring, sampling and vector control.

**Keywords:** citrus greening disease, geographic information systems, interpolation, risk.

## Introduction

The global citrus industry is under serious threat by the occurrence of the citrus greening disease (HLB), the most devastating citrus disease (da Graca, 1991; Bové and Garnier, 2002; da Graca and Korsten, 2004; Bové, 2006), even higher in importance to the citrus tristeza (citrus tristeza virus), the catastrophic effects caused the death of more than 116 million citrus trees in the world (Roistacher and Bar-Joseph, 1987; Rocha-Peña *et al.*, 1995; Roman *et al.*, 2004). The first detection of HLB in the Americas was in 2004, in the state of Sao Paulo, Brazil. Since this confirmation in Florida, USA, in 2005, the spread of the disease and its vector through the Caribbean, Central and North America, has been considerably faster (Gottwald *et al.*, 2007; National Research Council, 2010). Losses effects of this disease are substantial; only in Africa and Asia, caused the death of 60 million trees (da Graca and Korsten, 2004; Thohirah *et al.*, 2009) in Sao Paulo, Brazil, in the period of 2005-2013 was responsible for the elimination of approximately 35 million trees (Fruit Portal, 2014). In Mexico, through actions in the National Priority Plant Campaign against HLB was first detected in July 2009 in backyard trees in Tizimín, Yucatán; currently, the disease has been detected in 14 of the 23 states (SENASICA, 2014).

The social and economic impact estimated in HLB, established three years, in a scenario of high presence in Mexico, and economic impact would be the loss of 1.7 million tonnes and 112.2 million in wages, being more vulnerable orange cultivation. Regarding Mexican exports of processed fresh citrus, mean reduction in foreign exchange

112.2 millones de jornales, siendo, más vulnerable el cultivo de la naranja. Respecto a la exportación mexicana de cítricos frescos procesados, implicaría la reducción en el ingreso de divisas al país de 157 millones de dólares con respecto al año 2008 (Salcedo *et al.*, 2010). Hoy en día, el limón mexicano también ha sido afectado por esta enfermedad. En abril de 2010, se informó de su presencia en la región productora de este cítrico en Tecomán, Colima, donde el Comité Estatal de Sanidad Vegetal de este estado (CESAVECOL) detectó más de 1 200 plantas sintomáticas en 140 huertas comerciales en los municipios de Tecomán, Armería, Manzanillo y Coquimatlán, desde los límites con el Estado de Michoacán hasta los del Estado de Jalisco, México; información precisa de las pérdidas de rendimiento que causa el HLB a través del tiempo es difícil de recabar debido a que es normal derribar los árboles positivos a dicha enfermedad (Flores *et al.*, 2010; Robles *et al.*, 2013).

El psílido asiático de los cítricos, *Diaphorina citri* (*D. citri*) Kuwayama (Hemiptera: Liviidae), además de que en infestaciones fuertes puede matar los brotes vegetativos o causar la abscisión de las hojas de los cítricos (Halbert y Manjunath, 2004), es el vector de *Candidatus Liberibacter* spp., una  $\alpha$ -proteobacteria restringida al floema, considerada como el agente putativo del HLB (Bové y Garnier, 2002; da Graca y Korsten, 2004; Bové, 2006). Las mayores infestaciones de *D. citri* pueden ocurrir en cualquier momento, siempre que existan condiciones ambientales favorables y disponibilidad de brotes vegetativos, cuya producción depende del clima, edad y variedad de la planta (Liu y Tsai, 2000; Medina *et al.*, 2007; Hall *et al.*, 2013). Por su parte, Aurambout *et al.* (2009) señala que la presencia y abundancia de *D. citri* es influenciada por múltiples componentes bióticos y abióticos, sobresalen de estos últimos la temperatura, humedad relativa y precipitación.

En algunos estudios sobre la presencia y abundancia *D. citri* en México, se delimitó la distribución espacial de su hábitat y su tasa de crecimiento poblacional; para tal efecto, Torres *et al.* (2013) analizaron series históricas diarias de temperatura y precipitación de todo el país y clasificaron las zonas cítrícolas, en relación con la probabilidad de presentar condiciones favorables, para la reproducción continua y acelerada de *D. citri*. López-Collado *et al.* (2013) estimaron la distribución del hábitat y tasas de crecimiento poblacional de *D. citri* con el programa MaxEnt, el cual emplea capas bioclimáticas y datos puntuales de localización y distribución geográfica de la tasa de desarrollo y crecimiento poblacional. Mediante el ajuste de un modelo no-lineal, se utilizó la temperatura media anual como variable predictiva de su presencia potencial en un área

earnings to the country of 157 million with respect to 2008 (Salcedo *et al.*, 2010). Today, the Mexican lime has also been affected by this disease. On April, 2010, it was reported its presence in the growing region of Tecomán, Colima, where the State Committee on Plant Health of this State (CESAVECOL) detected more than 1 200 symptomatic plants in 140 commercial orchards in the municipalities of Tecomán, Armería, Manzanillo and Coquimatlán from the border with the state of Michoacán to the state of Jalisco, Mexico; accurate information of yield losses caused by HLB over time is difficult to obtain because cutting down the trees with this disease is often used (Flores *et al.*, 2010; Robles *et al.*, 2013).

The Asian citrus psyllid, *Diaphorina citri* (*D. citri*) Kuwayama (Hemiptera: Liviidae) as well as in heavy infestations can kill vegetative buds or cause abscission of citrus leaves (Halbert and Manjunath, 2004) is the vector of *Candidatus liberibacter* spp., a proteobacteria restricted to phloem, considered as the putative agent of HLB. (Bové and Garnier, 2002; da Graca and Korsten, 2004; Bové, 2006). The largest infestations of *D. citri* can occur at any time, as long as there are favorable environmental conditions provided and availability of vegetative shoots, whose production depends on climate, age and variety of the plant (Liu and Tsai, 2000; Medina *et al.*, 2007; Hall *et al.*, 2013). Meanwhile, Aurambout *et al.* (2009) notes that the presence and abundance of *D. citri* is influenced by multiple biotic and abiotic components protruding from the latter temperature, relative humidity and precipitation.

In some studies on the presence and abundance of *D. citri* in Mexico, the spatial distribution of habitat and population growth rate was delimited; for this purpose, Torres *et al.* (2013) analyzed daily time series of temperature and precipitation across the country and classified citrus areas in relation to the probability of favorable conditions for continuous and accelerated reproduction of *D. citri*. López-Collado *et al.* (2013) estimated the distribution of the habitat and population growth rates of *D. citri* with MaxEnt program, which employs bioclimatic layers and point location data and geographical distribution of the rate of development and population growth. By adjusting a non-linear model, the average temperature used was a predictor of their potential presence in a given area. Because the definition or identification of areas at risk of developing the disease or the vector is vital for the planning of their management, this study was performed in order

determinada. Debido a que la delimitación o identificación de áreas de riesgo de desarrollo de la enfermedad o el vector es vital para la planeación de su manejo, el presente estudio se realizó con el objetivo de delimitar las zonas de riesgo de presencia y abundancia del vector del HLB en México, a través del uso de sistemas de información geográfica (SIG), modelación climática y técnicas de interpolación espacial.

## Materiales y métodos

Para delimitar las áreas de riesgo agroclimático de *D. citri* se efectuaron dos etapas. La primera consistió en procesar la información climática y la referente a la superficie plantada de cítricos en el ámbito municipal; la segunda etapa consistió en integrar la información resultante a un SIG, para calcular el índice de riesgo potencial medio, a partir del cual se realizó la interpolación espacial. Cada proceso implicó los subprocesos señalados en la Figura 1, y explicados en líneas subsiguientes.

### Proceso de la información climática

Para el cálculo de dos índices asociados al desarrollo de *D. citri*, generaciones potenciales y días favorables, se emplearon datos diarios del periodo 1980-2010, procedentes de 3 333 estaciones del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), los cuales se integraron para su procesamiento, consulta y análisis en el SICLIMA-INIFAP desarrollado por Díaz y Cortina (2010); dicho sistema generó una base de datos con resultados de cálculo de temperaturas mínimas, máximas y medias históricas diarias para cada estación. En este sistema se implementaron las fórmulas básicas para obtener las normales de temperatura.

$$\widehat{T}_{\max_i} = \frac{1}{n \text{ años}} * [\sum T_{\max}(\text{día}_j, \text{año}_k)] \quad 1)$$

Donde:  $i$ = estación 1 ... estación 3 333;  $j$ = 1 ... 365;  $k$ = año 1 ... año  $n$  de cada estación

$$\widehat{T}_{\min_i} = \frac{1}{n \text{ años}} * [\sum T_{\min}(\text{día}_j, \text{año}_k)] \quad 2)$$

Donde:  $i$ = estación 1 ... estación 3 333;  $j$ = 1 ... 365;  $k$ = año 1 ... año  $n$  de cada estación

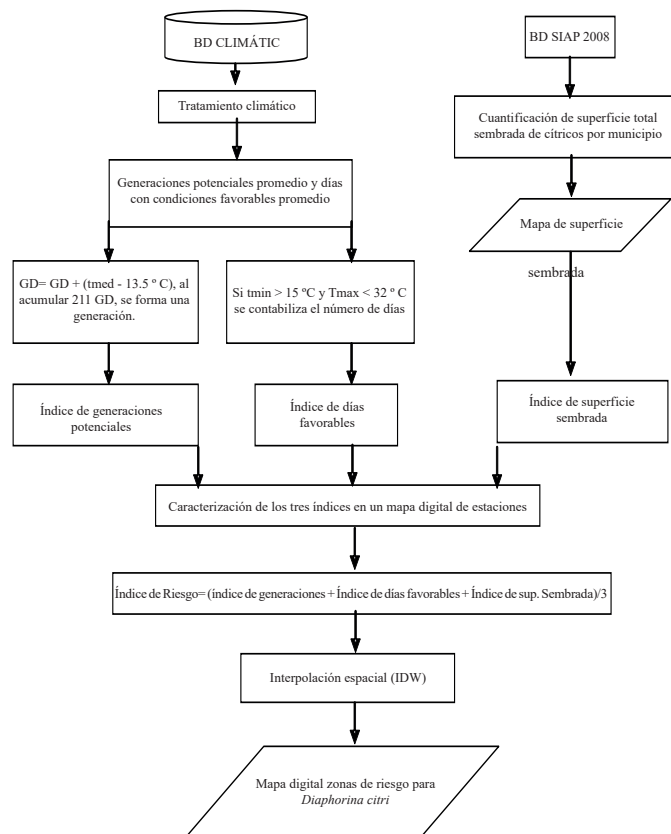
$$\widehat{T}_{\text{med}_i} = \frac{1}{2} * [\widehat{T}_{\max_j} + \widehat{T}_{\min_j}] \quad 3)$$

Donde:  $i$ = estación 1 ... estación 3 333;  $j$ = 1 ... 365

to identify areas of risk occurrence and abundance of the vector of HLB in Mexico, through the use of Geographic Information Systems (GIS), climate modeling and spatial interpolation techniques.

## Materials and methods

For delineate agroclimatic risk areas of *D. citri* two steps were necessary. The first one consisted on processing climate information concerning citrus plantings at the municipal level; the second step was to integrate the resulting information into a GIS to calculate the average rate of potential risk, from which the spatial interpolation is performed. Each process involved threads indicated in Figure 1, and explained in subsequent lines.



**Figura 1. Pasos a seguir para delimitar zonas de riesgo de la distribución potencial de *Diaphorina citri*. BD= base de datos; SIAP= Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera; GD= grados día. Umbral de desarrollo tomado de Nava *et al.*, 2007.**

**Figure 1. Steps for defining risk areas of potential distribution of *Diaphorina citri*; BD= database; SIAP= Agricultural and Fisheries Information System (SIAP); GD= degree day. Development threshold taken from Nava *et al.* (2007).**

**Grados día (GD):** se define como la tasa de crecimiento o desarrollo biológico en plantas e insectos, su base es la cantidad de calor que una planta o insecto acumula durante una estación de crecimiento. Cada especie, sean cultivos, insectos, o enfermedades, se adaptan para desarrollarse a una temperatura base y disminuir su crecimiento a una temperatura máxima (Oliver, 2005); uno de los métodos más empleados es el método residual (Torres, 1995). En el caso de *D. citri* se consideró la temperatura umbral de 13.5°C (Nava *et al.*, 2007), la cual se restó a la temperatura media diaria histórica del día  $j$  ( $t_{med_j}$ ). La operación queda definida como:

$$GD_j = T_{med_j} - 13.5 \quad 4)$$

Donde:  $t_{med_j} = (t_{min_j} + t_{max_j})/2$ ;  $j = 1 \dots 365$

**Número de generaciones potenciales (NGP):** de acuerdo con Nava *et al.* (2007), se requieren 211 GD para completar el desarrollo de una generación de *D. citri*; para tal efecto, se procedió a realizar el cálculo de generaciones potenciales con una temperatura umbral de 13.5°C para cada una de las 3 333 estaciones con la siguiente fórmula.

$$\widehat{NGP}_i = \frac{(\sum T_{med_i} \text{ día}_j, \text{ año}_k) - (T_{base} * NDT)}{GD} \quad 5)$$

Donde:  $i = \text{estación } 1 \dots \text{estación } 3\,333$ ;  $j = 1 \dots 365$ ;  $k = \text{año } 1 \dots \text{año } n$  de cada estación;  $T_{base} = 13.5^\circ\text{C}$ ;  $NDT = \text{Número de días totales}$ ;  $GD = 211$ ;  $NAT = \text{Número de años totales}$ .

**Índice de Generaciones Potenciales (IGP):** una vez calculado el número de generaciones potenciales para cada estación, se calculó el índice de generaciones potenciales con respecto al máximo identificado en todas las estaciones, esto se hizo con la siguiente fórmula.

$$IGP_i = \frac{\widehat{NGP}_i}{\widehat{NGP}_{i\text{máximo}}} \quad 6)$$

**Número de días con condiciones favorables (NDCF):** un día favorable es cuando la temperatura mínima es mayor a 15°C, y la máxima menor a 32°C, estos valores son descritos por Moschini *et al.* (2010) como temperaturas de confort para el desarrollo de *D. citri* y se puede expresar como:

$$\widehat{NDCF}_i = \frac{\sum DF(\text{día}_j, \text{año}_k)}{NAT} \quad 7)$$

## Climate information process

For the calculation of two indices associated to the development of *D. citri*, generation potential and favorable days, daily data for the period 1980-2010 were used, from 3 333 stations (NWS) National Weather Service, which were integrated for processing, query and analysis in the SICLIMA-INIFAP developed by Díaz and Cortina (2010); the system generated a database with results of calculation of minimum, maximum and mean daily historical temperatures for each station. In this system, the basic formulas were implemented for the normal temperature.

$$\widehat{Tmax}_i = \frac{1}{n \text{ years}} * [\sum Tmax(\text{day}_j, \text{year}_k)] \quad 1)$$

Where:  $i = \text{station } 1 \dots \text{station } 3\,333$ ;  $j = 1 \dots 365$ ;  $k = \text{year } 1 \dots \text{year for each station}$

$$\widehat{Tmin}_i = \frac{1}{n \text{ years}} * [\sum Tmin(\text{day}_j, \text{year}_k)] \quad 2)$$

Where:  $i = \text{station } 1 \dots \text{station } 3\,333$ ;  $j = 1 \dots 365$ ;  $k = \text{year } 1 \dots \text{year for each station}$

$$\widehat{Tmed}_i = \frac{1}{2} * [\widehat{Tmax}_i + \widehat{Tmin}_i] \quad 3)$$

Where:  $i = \text{station } 1 \dots \text{station } 3\,333$ ;  $j = 1 \dots 365$

**Degree days (GD):** is defined as the rate of biological growth or development in plants and insects, its basis is the amount of heat that builds a plant or insect during a growing season. Each species, either crops, insects or diseases, adapt to be implemented at a base temperature and decrease a maximum temperature increase (Oliver, 2005); one of the most commonly used methods is the residual method (Torres, 1995). In the case of *D. citri* was considered the threshold temperature of 13.5°C (Nava *et al.*, 2007), which was subtracted from the average historic daily temperature. The operation is defined as:

$$GD_j = T_{med_j} - 13.5 \quad (4)$$

Where:  $t_{med_j} = (t_{min_j} + t_{max_j})/2$ ;  $j = 1 \dots 365$

**Number of potential generations (NGP):** according to Nava *et al.* (2007), 211 GD are required to complete the development of a generation of *D. citri*; for this purpose, we proceeded to perform the calculation of a threshold of potential generation temperature of 13.5°C for each of the stations 3 333 using the following formula.

Donde:

DF= Día favorable  $\begin{cases} 1: T_{min} > 15\text{ }^{\circ}\text{C} \text{ y } T_{max} < 32\text{ }^{\circ}\text{C}; \\ 0: \text{no se cumple la condición} \end{cases}$ ;  
 NAT= Número de años totales; i= estación 1 ... estación 3 333; j= 1 ... 365; k= año 1 ... año n de cada estación.

**Índice de días con condiciones favorables (IDCF):** este índice fue calculado sobre la base de la información generada de *DCF* calculándose el cociente de días con condiciones favorables y el máximo registrado en todas las estaciones analizadas, la expresión asociada a este índice se muestra en la siguiente expresión:

$$IDCF_i = \frac{\widehat{NDCF}_i}{\widehat{NDCF}_i \text{ máximo}} \quad 8)$$

**Procesamiento de información sobre superficie cultivada de cítricos**

En la página del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2014), se consultó la superficie plantada con cítricos en los municipios productores para el año agrícola 2008; la cual se procesó, para conformar una base de datos con una estructura de fácil integración a un SIG, con el fin de para diferenciar la superficie plantada en municipios productores de cítricos en México, en una cobertura poligonal (Figura 4). Después, se realizó un proceso cartográfico de asignación de datos por ubicación (spatial join), es decir, se trasladó la información de una cobertura poligonal (municipios) a una puntual (estaciones del SMN) para homogeneizar y facilitar el procesamiento de la información.

**Superficie plantada de cítricos (SPC):** se estimó con la siguiente ecuación:

$$SPC = \sum_i^n \text{Municipio } i \quad 9)$$

Donde: i= municipio 1, 2, 3, ..., n

Cítricos considerados para el cálculo SPC: lima, limón, mandarina, naranja, tangerina y toronja.

**Índice de superficie plantada con cítricos (ISPC):** se estimó con la siguiente ecuación:

$$ISPC_i = \frac{\widehat{SPC}_i}{\widehat{SPC}_i \text{ máximo}} \quad 10)$$

$$\widehat{NGP}_i = \frac{(\sum T_{med_i} \text{ day}_j, \text{ year}_k) - (T_{base} * NDT)}{GD} \quad 5)$$

Where: i= station 1 ... station 3 333; j= 1 ... 365; k= year 1 ... year for each station; Tbase= 13.5 °C; NDT= number of total days; GD= 211; NAT= number of total years

**Index of potential generations (IGP):** once calculated the potential number of generations for each station, the rate of potential generation from the peak identified at all stations was calculated, this was done with the following formula.

$$IGP_i = \frac{\widehat{NGP}_i}{\widehat{NGP}_i \text{ maximum}} \quad 6)$$

**Number of days with favorable conditions (NDCF):** a favorable day is when the minimum temperature is above 15 °C, and less than 32 °C as maximum, these values are described by Moschini *et al.* (2010) as comfort *temperatures*; development of *D. citri* and can be expressed as:

$$\widehat{NDCF}_i = \frac{\sum DF(\text{day}_j, \text{year}_k)}{NAT} \quad 7)$$

Where:

DF= Favorable year  $\begin{cases} 1: T_{min} > 15\text{ }^{\circ}\text{C} \text{ y } T_{max} < 32\text{ }^{\circ}\text{C}; \\ 0: \text{condition not filled} \end{cases}$ ;  
 NAT= Number of total years; i= station 1 ... station 3 333; j= 1 ... 365; k= year 1 ... year for each station.

**Index of days with favorable conditions (IDCF):** this index was calculated based on the information generated from *DCF*, calculated the ratio of days with favorable conditions and the maximum recorded at all stations analyzed, the expression associated with this index is shown in the following expression:

$$IDCF_i = \frac{\widehat{NDCF}_i}{\widehat{NDCF}_i \text{ maximum}} \quad 8)$$

**Processing information about citrus acreage**

On the Agricultural and Fisheries Information Service (SIAP, 2014), the area planted to citrus producing municipalities for the 2008 crop year were consulted; which is processed to form a database with a structure easily integrated into a GIS, in order to differentiate the area planted in citrus producing municipalities in Mexico,

**Índice de riesgo potencial medio (IRPM):** Se calculó el promedio aritmético de los tres índices descritos con anterioridad y que se representa como:

$$\widehat{IRPM}_i = \frac{1}{3} * (IGP_i + IDCF_i + ISPC_i) \quad (11)$$

Donde: IRPM= índice de riesgo potencial medio; IGP= índice de generaciones potenciales; IDCF= índice de días con condiciones favorables; ISPC= índice de superficie plantada con cítricos.

### Interpolación espacial de datos puntuales

La información resultante se almacenó en una base de datos asociada a las estaciones climáticas, referenciadas a una ubicación geográfica con valores de longitud (X) y latitud (Y), estos datos se exportaron a ArcGis el cual permite asociar la base de datos a un mapa digital de puntos georreferenciados; este software incluye un módulo de análisis geoestadístico para realizar procesos de interpolación espacial, el cual recibe el nombre de Geostatistical Analyst. Un proceso de interpolación genera una superficie continua de datos conformada por celdas que representan la información de un espacio geográfico basado en un grupo de puntos equidistantes (Johnston *et al.*, 2001).

En este estudio el proceso de interpolación espacial empleado fue el de Inverso de la Distancia Optimizado, este método calcula el valor de un punto ponderando las mediciones de puntos vecinos en relación con su distancia, asigna el mayor peso al punto más cercano y disminuye en proporción a la distancia del resto de puntos (Burrough, 1997). La ecuación básica de este método es:

$$p_e = \sum_{i=1}^n w_i p_i \quad (12)$$

Donde:  $p_e$  es el dato que se requiere estimar en el sitio  $e$ ;  $p_i$  indica el valor correspondiente a la estación vecina  $i$ ;  $N$  representa el número total de estaciones cercanas al sitio  $e$  que se emplearán para estimar el dato del sitio  $i$  y  $w_i$  denota el peso de la estación  $i$  calculado mediante la expresión:

$$w_i = N \left( \frac{1}{d_{e,i}} \right)^\beta / \sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{d_{e,i}} \right)^\beta \quad (13)$$

Donde:  $N$  es el número total de estaciones;  $d_{e,i}$  representa la distancia entre el sitio a estimar  $e$  y la estación  $i$ , y  $\beta$  indica el valor de potencial empleado, el cual es optimizado por el software.

in a polygonal coverage (Figure 4). Then a mapping process mapping data by location (spatial join) was performed; i.e. information from a polygonal coverage (municipalities) to a point (SMN stations) to standardize and facilitate information processing.

**Area planted with citrus (SPC):** was estimated with the following equation:

$$SPC = \sum_i^n \text{Municipality } i \quad (9)$$

Where:  $i$ : municipio 1, 2, 3, ...,  $n$

Citrus considered for SPC calculation: lime, lemon, tangerine, orange, tangerine and grapefruit.

**Index citrus plantings (ISPC):** was estimated with the following equation:

$$ISPC_i = \frac{\widehat{SPC}_i}{\widehat{SPC}_i \text{ maximum}} \quad (10)$$

**Medium potential risk index (IRPM):** the arithmetic average of the three indices described above was calculated and shown as:

$$\widehat{IRPM}_i = \frac{1}{3} * (IGP_i + IDCF_i + ISPC_i) \quad (11)$$

Where: IRPM= mean medium risk index; IGP= potencial generations index; IDFC= favorable days with required conditions index; ISPC= citrus planted area index.

### Spatial interpolation of specific data

The resulting information is stored in a database associated with the seasons, referenced to a geographic location with length values (X) and latitude (Y), these data were exported to ArcGIS which allows the database to associate a georeferenced digital map points; This software includes a module for performing geostatistical analysis of spatial interpolation process, which is called Geostatistical Analyst. An interpolation process produces a continuous surface formed by data cells that represent information of a geographical area based on a set of points equidistant from Johnston *et al.* (2001).

In this study the spatial interpolation process employed was optimized inverse distance method to calculate the weighting value of a point neighboring measurement points relative

La interpolación espacial de datos se aplicó a los valores puntuales de IGP, IDCF e IRPM resultando en productos cartográficos con la dispersión espacial de cada indicador.

## Resultados

### Número de generaciones potenciales (NGP)

El máximo número de generaciones potenciales fue de 34 en el estado de Sonora y de 28 en Chiapas, Guerrero y Michoacán. Los valores de temperatura media anual asociados a estos máximos son: media de 23.2 a 29.7 °C, máxima de 30 a 37 °C y mínima de 13 a 22 °C; y una altitud de 50 a 420 metros sobre el nivel medio del mar (msnm). (Cuadro 1).

**Cuadro 1. Número de generaciones potenciales de *Diaphorina citri* en zonas cítricas de México.**

**Table 1. Potential number of generations *Diaphorina citri* in citrus-growing areas of Mexico.**

Nombre	Municipio	Estado	Latitud	Longitud	Altura	NGP	IGP
Tacupeto (CFG)	Rosario	Sonora	28.258	-109.299	420	34	1
Pichucalco (DGE)	Pichucalco	Chiapas	17.509	-93.12	50	28	0.82
Aratichanguio	Zirándaro	Guerrero	18.476	-101.359	300	28	0.82
Los Pinzanes (CFE)	Huetamo	Michoacán	18.543	-101.104	372	28	0.82
San Jerónimo (CFE)	Huetamo	Michoacán	18.531	-101.326	180	28	0.82

NGP= número de generaciones potenciales; IGP= índice de generaciones potenciales.

Sobre la base de los resultados de NGP de cada una de las estaciones climatológicas (información puntual), se generó una superficie continua de valores mediante el modelo de inverso de la distancia optimizado obteniendo el mapa mostrado en la Figura 2, donde se destaca que en todo el territorio de la península de Yucatán y Tabasco, en la mayor parte de Veracruz y Tamaulipas, el noreste de Nuevo León y este de San Luis Potosí, pueden desarrollarse entre 15 y 33 generaciones potenciales de *D. citri*. Respecto a los estados de la vertiente hacia el océano Pacífico, se forma una franja que inicia en el centro-sur de Sonora, se extiende a través del territorio sinaloense, decrece en el sur del estado de Nayarit, y se amplía otra vez desde Puerto Vallarta, Jalisco, cubriendo en su totalidad los estados de Colima, Guerrero y Chiapas; y algunas áreas del centro-sur de Michoacán, sur-oeste de Oaxaca e Istmo de Tehuantepec.

to the distance, the larger weight assigned to the closest point and decreases in proportion distance to other points (Burrough, 1997). The very basic equation for this method is:

$$p_e = \sum_{i=1}^n w_i p_i \quad (12)$$

Where:  $p_e$  = is the data that is required estimate on site;  $p_i$  = indicates the value corresponding to the neighboring estimate  $i$ ;  $N$  = represents the total number of stations close to the  $e$  site to be used to estimate the data of the site  $i$  and  $w_i$  = denotes the weight of the station  $i$  calculated by the expression:

The spatial interpolation of data was applied to the spot value of IGP, IRPM and IDCF cartographic products resulting in the spatial dispersion of each indicator.

$$w_i = N \left( \frac{1}{d_{e,i}} \right)^\beta / \sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{d_{e,i}} \right)^\beta \quad (13)$$

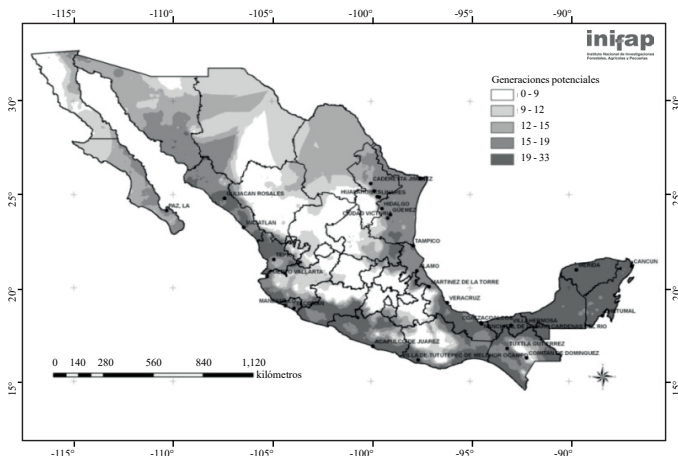
Where:  $N$  = total number of stations;  $d_{e,i}$  = represents the distance between the site at to estimate  $e$  and the station  $i$ , and  $\beta$  = indicates the value of potential employee, wich is optimized by the software.

## Results

### Number of potential generations (NGP)

The maximum potential number of generations was 34 in the state of Sonora and 28 in Chiapas, Guerrero and Michoacán. The annual average temperature values associated with these peaks are: mean 23.2 to 29.7 °C, with a high of 30 to 37 °C and minimum of 13 to 22 °C; and a height of 50-420 meters (Table 1).





**Figura 2. Distribución espacial del Número de Generaciones Potenciales (NGP) de *Diaphorina citri*.**

**Figure 2. Spatial distribution of the number of potential generations (NGP) of *Diaphorina citri*.**

**Número de días con condiciones favorables (NDCF)**

Los valores máximos de días favorables correspondieron a los estados de Chiapas y Guerrero, donde prácticamente los 365 días del año son favorables para el desarrollo de *D. citri* (Cuadro 2). Las temperaturas medias asociadas a estos máximos son de 22 a 25 °C, las máximas de 26 a 30 °C y las mínimas de 18 a 21 °C, y la altitud desde los 80 hasta los 1 220 msnm. Lo anterior sugiere que las temperaturas favorables se pueden presentar tanto en partes bajas como en las relativamente altas. Con base en los datos de temperatura de la estación climatológica finca San Cristóbal, Chiapas, se encontró que 361 de los 365 días del año, se presentan condiciones favorables para la presencia potencial de *D. citri*.

**Cuadro 2. Índice de días con condiciones favorables (IDCF) para el desarrollo de *Diaphorina citri*.**

**Table 2. Contents of days with favorable conditions (IDCF) to develop *Diaphorina citri*.**

Nombre	Municipio	Estado	Latitud	Longitud	Altura	NDCF	IDCF
Finca San Cristóbal	Tuzantán	Chiapas	15.184	-92.363	1050	361	1
San Juan de las Flores	Atoyac de Álvarez	Guerrero	17.317	-100.398	630	353	0.98
Tanque Regulador	Tapachula	Chiapas	14.833	-92.283	80	352	0.98
Cuetzála del Progreso	Cuetzála	Guerrero	18.134	-99.831	1220	348	0.96
El Perú	Tapachula	Chiapas	15.1	-92.267	800	342	0.95

NDCF= número de días con condiciones favorables; IDCF= índice de días con condiciones favorables.

Una vez realizada la interpolación espacial de NDCF, se obtuvo el mapa que se presenta en la Figura 3, donde sobresale el número de días con condiciones favorables para el desarrollo de *D. citri* en los estados de la vertiente del Golfo de México, destaca una franja en el este de Tamaulipas

Based on the results of NGP of each of the weather stations (specific information), a continuous surface of values generated by the model of the inverse distance optimized obtaining the map shown in Figure 2, which stresses that at whole territory of the peninsula of Yucatán and Tabasco, in most of Veracruz and Tamaulipas, northern Nuevo León and eastern San Luis Potosí, can grow between 15 and 33 potential generations of *D. citri*.

Regarding the statements of the slope toward the Pacific Ocean, a strip that starts in the south-central Sonora is formed, stretching through the territory of Sinaloa, decreases in the southern state of Nayarit, and expands again from Puerto Vallarta, Jalisco, entirely covering the states of Colima, Guerrero and Chiapas; and some areas of south-central Michoacán, southwest of Oaxaca and the Isthmus of Tehuantepec.

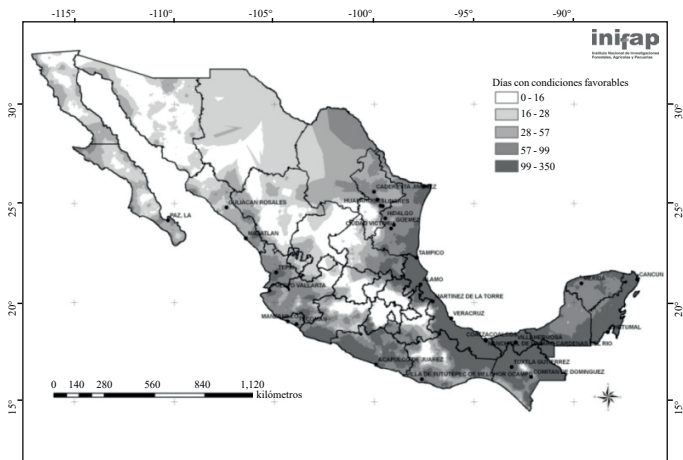
**Number of days with favorable conditions (NDCF)**

The maximum values of favorable days correspond to the states of Chiapas and Guerrero, where almost 365 days a year are favorable for the development of *D. citri* (Table 2). The average temperatures associated with these peaks are between 22 and 25 °C, maximum of 26 to 30 °C and minimum of 18 to 21 °C, and elevations from 80 to 1 220 m. This suggests that favorable temperatures can occur in both lowlands and relatively high. Based on the temperature data from the weather station finca San Cristóbal, Chiapas, it was found that 361 of the 365 days of the year, favorable conditions are presented for the presence of potential *D. citri*.

Once the spatial interpolation NDCF, the map presented in Figure 3, where the number of days with favorable conditions stands for the development of *D. citri* was obtained in the states of the slope of the Gulf of Mexico, stands a strip in eastern Tamaulipas where it is possible that there are from

donde es posible que existan de 74 a 350 días con condiciones favorables, en tanto que el estado de Veracruz presenta rangos de entre 99 y 350, para este estado se observa que en la región del Cofre de Perote, a partir de la cota altitudinal de 1200 msnm, existe un descenso abrupto de días con condiciones favorables, debido a la disminución de la temperatura por efecto de un gradiente altitudinal, lo cual puede establecerse como barrera natural límite del potencial de desarrollo de *D. citri*. Lo anterior podría significar una oportunidad de establecer cítricos de climas templados que no estarían bajo la amenaza potencial de Huanglongbing. En cuanto a los estados ubicados en el litoral del Océano Pacífico, se observa que en la mayor parte del Estado de Chiapas y en la región norte de Oaxaca, resultaron con más de 136 días con condiciones favorables.

74 to 350 days with favorable conditions, while the state of Veracruz has ranges between 99 and 350, for this state is observed in the region of the Cofre de Perote, since the elevation of 1 200 meters above sea level, there is an abrupt decrease of days with favorable conditions, due to the decrease in temperature as a result of an altitudinal gradient, which can be established as a natural barrier limit the potential for development of *D. citri*. This could be an opportunity to establish citrus temperate climates that would not be under the potential threat of the citrus greening disease. As for the states located on the coast of the Pacific Ocean, it is observed that in most of the state of Chiapas and the northern region of Oaxaca, there were more than 136 days with favorable conditions.



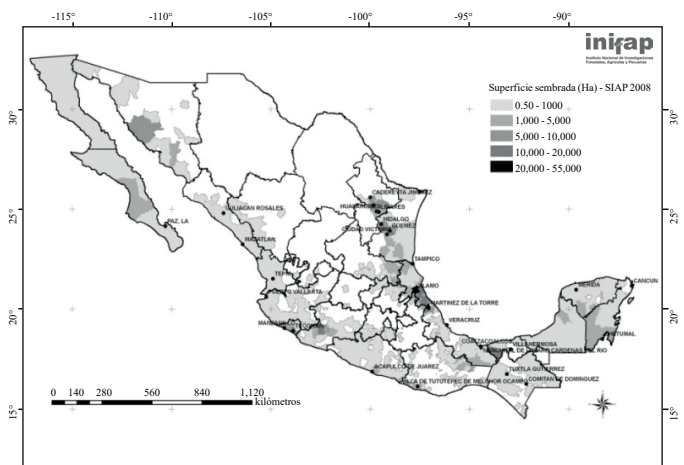
**Figura 3. Distribución espacial de días con condiciones favorables para el desarrollo de *Diaphorina citri*.**  
**Figure 3. Spatial distribution of days with favorable development conditions *Diaphorina citri*.**

**Índice de superficie plantada (ISP) de cítricos en México**

Se obtuvo la información de la superficie plantada de cítricos de cada uno de los municipios del país. La distribución geográfica de este indicador (Figura 4). Los municipios con mayor extensión de superficie se ubican en los estados de Veracruz, Tamaulipas, Tabasco, Michoacán y Colima, con superficies que van de 10 mil a 55 mil ha, en tanto que para estados como Sonora, Nuevo León y Michoacán se registran superficies en los municipios de entre 5 y 10 mil ha.

**Index plantings (ISP) of citrus in Mexico**

Information plantings of citrus in each of the municipalities obtained. The geographical distribution of this indicator (Figure 4). The municipalities with the greatest increase in area is located in the states of Veracruz, Tamaulipas, Tabasco, Michoacán and Colima, ranging in size from 10 000 to 55 000 ha, while for states like Sonora, Nuevo León and Michoacán surfaces are recorded in the municipalities of between 5 and 10 thousand ha.



**Figura 4. Representación de la superficie plantada en municipios productores de cítricos en México.**  
**Figure 4. Representation of the planted are of citrus-producing municipalities in Mexico.**

**Índice de riesgo promedio (IRPM)**

Una vez calculados los índices anteriores, se procedió al cálculo del índice de riesgo promedio puntual, basado en la ecuación 11, para cada estación considerada en el presente

**Average risk index (IRPM)**

Once the above indices were obtained, the average spot rate risk, based on equation 11, for each station considered in the present study is calculated. Like the previous indexes,

estudio. Al igual que los índices anteriores, a partir de la información puntual y mediante técnicas de interpolación espacial se obtuvo la representación geográfica de la Figura 5, donde los tonos van de blancos (menor riesgo) a gris intenso (mayor riesgo). Lo anterior permitió presentar en un solo mapa los tres índices parciales. Es posible observar los estados con las condiciones más apropiadas para que *D. citri* pueda desarrollarse considerando los tres índices: superficie plantada, generaciones potenciales y días favorables. Es importante destacar que por arriba de la cota altitudinal de 1,200 msnm, se forma una barrera física natural que podría impedir la presencia potencial de *D. citri*.

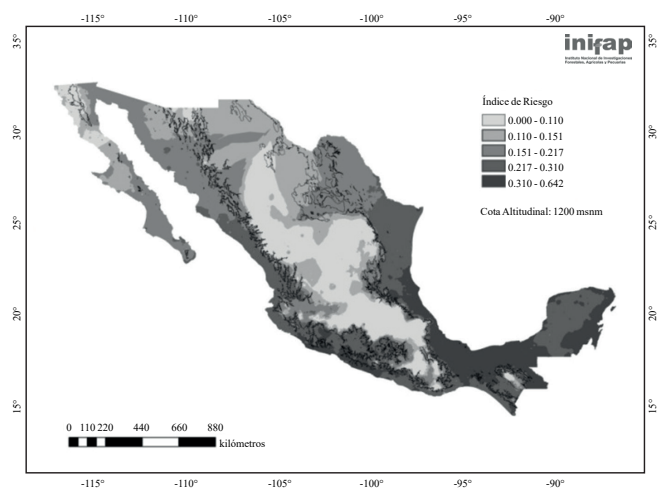
Las estaciones climatológicas con mayores índices de riesgo puntual promediado (IRPM), se ubican en el norte de Veracruz: Álamo, Martínez de la Torre y Papantla; y la de Atoyac de Álvarez en el estado de Guerrero. Los valores más altos a nivel nacional corresponden a la estación de Álamo Temapache del estado de Veracruz con valores de IRPM de 0.64, con una temperatura cercana entre 24 y 25.5 °C y con una altitud media sobre el nivel medio del mar por debajo de los 50 metros. Las zonas más propensas para que se desarrolle *D. citri* son las superficies costeras, siendo las frontales Golfo de México, donde existen las condiciones más favorables para su desarrollo. Destaca además que el sureste y norte del estado de Veracruz y los estados de Quintana Roo y Chiapas, predominan índices de riesgo altos. En la costa del pacifico los estados de Oaxaca, Guerrero y Michoacán presentan clases intermedias de riesgo (Figura 5).

## Discusión

Los diferentes índices obtenidos en el estudio generaron información que es relevante para el manejo del Huanglongbing en México; por ejemplo, en el IGP, índice de generaciones potenciales, los municipios de Rosario, Sonora, y Pichucalco, Chiapas, resultaron con 34 y 28 generaciones potenciales anuales, respectivamente (Cuadro 1); lo que podría considerarse como las áreas donde confluyen las condiciones de temperatura para producir este número de generaciones, las cuales al traslaparse resultarán en densidades poblacionales con niveles excesivamente altos e infestaciones resultantes severas. En lo referente al IDCF, índice de días con condiciones favorable para el desarrollo de *D. citri*, mostró que las localidades de Tuzantán, Chiapas, y Atoyac de Álvarez,

from the timely and spatial interpolation techniques using geographic representation of Figure 5, where the tones ranging from white (lowest risk) to deep gray (high risk) was obtained. This allowed a single map file in the three sub-indices. It is possible to observe the states with the most appropriate conditions for *D. citri* can be developed considering the three indexes: area planted, potential generations and favorable days. Importantly above the altitudinal elevation of 1 200 meters, a natural physical barrier that could prevent potential presence is formed *D. citri*.

Weather stations with higher risk averaged point (IRPM), are located in northern Veracruz: Álamo, Martínez de la Torre and Papantla and Atoyac de Álvarez in Guerrero state. Higher values correspond to national station Álamo Temapache, Veracruz state with IRPM values of 0.64, with a temperature between 24 and 25.5 °C and an average elevation above mean sea level below 50 m. The most likely areas to be developed for *D. citri* are coastal areas, with the Gulf of Mexico front, where the most favorable conditions for its development there. Further emphasizes the southeast and northern Veracruz state and the states of Quintana Roo and Chiapas, high risk rates predominate. In the Pacific coast states of Oaxaca, Guerrero and Michoacán have intermediate risk classes (Figure 5).



**Figura 5. Representación geográfica del proceso de interpolación del índice de riesgo potencial medio (IRPM).**

**Figure 5. Geographical representation of the interpolation process of the medium potential risk index (IRPM).**

Guerrero, presentaron los valores mayores (Cuadro 2), es decir, podría considerarse que son las localidades en el país donde el insecto encontraría posiblemente las condiciones ideales para su desarrollo. En lo que respecta al IRPM, el índice de riesgo promedio, el valor máximo se registró en los municipios de Álamo Temapache, Martínez de la Torre, y Papantla, Veracruz, y Atoyac de Álvarez, Guerrero (Cuadro 3), lo que los convierte en las zonas más propensas para que se desarrolle *D. citri* y en las cuales por la cantidad de especímenes del vector que se producirían, se podría acelerar el proceso epidémico una vez que exista la presencia del patógeno en la zona; en el escenario de ocurrencia de infección, dichas localidades podrían convertirse en una fuente altamente generadora de inóculo (Gutiérrez y Luigi, 2013). Por lo antes descrito, consideramos que en la modelación de zonas potenciales para la distribución de *D. citri* es apropiado contemplar índices diversos, ya que pudiera resultar que zonas con elevado índice de generaciones potenciales, no necesariamente fuesen las de mayor número de días favorables, lo que generaría confusiones, predicciones o interpretaciones erróneas; la consideración y análisis de dichos índices serviría para respaldar inferencias mejores de los resultados.

### Cuadro 3. Índice de riesgo promedio (IRP).

Table 3. Average risk index (IRP).

Nombre	Municipio	Altura	Tmax	IGP	IDCF	ISPC	IRPM = (IGP + IDCF + ISPC)/3
Álamo	Álamo Temapache, Ver.	19	25.45	0.618	0.316	1	0.64
Sombrerete	Álamo Temapache, Ver.	48	24.67	0.559	0.321	1	0.63
Martínez de la Torre (DGE)	Martínez de la Torre, Ver.	50	24.41	0.559	0.382	0.7	0.55
Adolfo Ruiz Cortines	Papantla, Ver.	50	23.97	0.529	0.673	0.36	0.52
San Juan de las Flores	Atoyac de Álvarez, Guerrero.	630	24.28	0.559	0.978	0	0.51

IRPM= índice de riesgo potencial medio; IGP= índice de generaciones potenciales; IDCF= índice de días con condiciones favorables; ISPC= índice de superficie plantada con cítricos; Tmax= temperatura máxima.

La información que es pronosticado por nuestro estudio presenta desviaciones respecto a lo existente en forma natural en el país; por ejemplo, actualmente Huanglongbing ha sido registrado en cuatro municipios del estado de Guerrero (Acapulco, Florencio Villareal, La Unión de Isidoro Montes de Oca, Petatlán) (SENASICA 2014); Atoyac de Álvarez, con valores altos de los índices IDCF e IRPM (Cuadros 2 y 3), permanece libre del patógeno, más se encuentra en las cercanías entre Acapulco y Petatlán; será de interés seguir al menos la intensidad de la enfermedad para conocer su desarrollo en un área que aparentemente favorece abundancia máxima del vector. Una respuesta similar a la anterior ocurre para el estado de Chiapas, donde existen infecciones por HLB en los municipios de

## Discussion

The different rates obtained in the study generated information that is relevant to the management of citrus greening disease in Mexico; for example, the IGP index of potential generations, the municipalities of Rosario, Sonora, and Pichucalco, Chiapas, were 34 and 28 with annual potential generations, respectively (Table 1); considered as areas where the temperature conditions to produce this number of generations converge, which will result in the overlap population densities with excessively high levels and resulting severe infestations. Regarding the IDCF, index of favorable days, conditions for the development of *D. citri*, showed that the locations of Tuzantán, Chiapas, and Atoyac de Álvarez, Guerrero, showed the highest values (Table 2); i.e. could be considered the locations in the country where the insect may find the ideal conditions for their development.

In regard to IRPM, the average risk index, the maximum value was recorded in the municipalities of Alamo Temapache, Martínez de la Torre, and Papantla, Veracruz,

and Atoyac de Álvarez, Guerrero (Table 3), which makes in the most likely areas to be developed for *D. citri* in which the number of specimens of the vector that would occur, it could accelerate the epidemic process once there is the presence of the pathogen in the area; the scene of occurrence of infection, these locations could become a highly generative source of inoculum (Gutiérrez and Luigi, 2013).

Considering all of this, we believe that in modeling the potential distribution areas, *D. citri* is appropriate to provide different rates, and that would be that areas with high rates of potential generations were not necessarily the highest number of favorable days, generating confusion or

Palenque, Ocosingo, Marqués de Comillas, y Benémerito de Las Américas (SENASICA, 2014). Pichucalco (IGP alto) y Tuzantán (IDCF máximo) (Cuadros 1 y 2) están libres de HLB.

Sobre la presencia de la enfermedad en Chiapas, es necesario indicar que se carece de un patrón de la epidemia claramente asociado con el posible desplazamiento natural del vector, ya que los municipios afectados están distantes (SENASICA, 2014); es probable que componentes antropocéntricos estuviesen relacionados con la aparición de la enfermedad en las áreas afectadas. Dichos factores por el momento no se han incluido en el modelo, ya que es difícil distinguir tendencias de su influencia que pudiesen convertirse en datos válidos para el sistema, ya que generalmente pueden suceder en forma accidental, circunstancial u ocurrir en una forma muy disgregada, y difícil de comparar por ejemplo con la información que analiza Gottwald *et al.* (2013) para detectar la enfermedad en medios urbanos en Estados Unidos de América.

Los pronósticos del modelo podrían ser mejorados con la incorporación de otras variables; por ejemplo la precipitación pluvial, humedad relativa, dirección y velocidad del viento, y la fenología del cultivo, sobre todo la etapa de brotación de yemas vegetativas, que es la fase de mayor riesgo de infestación por *D. citri* (Hall y Albrigo, 2007; Hall *et al.*, 2013).

Para los factores antropocéntricos se deberá de buscar una forma para ponderar su influencia. También, será necesario incluir y asignar una ponderación a posibles vías de entrada de especies invasoras; por ejemplo, las detecciones iniciales de árboles infectados por HLB ocurrieron en áreas cercanas a zonas turísticas o puertos marítimos de intercambio comercial (Península de Yucatán; Puerto Vallarta, Jalisco; Nuevo Vallarta, Nayarit; Manzanillo, Colima. Posteriormente Mazatlán, Sinaloa; Baja California Sur, y Acapulco, Guerrero (SENASICA, 2014). Si bien podría ser relativamente tarde para el caso de Huanglongbing, la metodología se considera que serviría para aplicarla contra las amenazas que existen sobre la agricultura nacional (Pimentel *et al.*, 2005; Hlasny, 2011; SENASICA, 2014).

En el estado actual del modelo, es innegable su contribución potencial a la planeación para realizar el manejo regional que se ha planteado para solucionar el problema (Bassanezi *et al.*, 2013; SENASICA, 2014).

misinterpretation predictions; consideration and analysis of these indices serve to support better inferences from the results.

The information that is predicted by our study presents deviations from what exists naturally in the country; for example, currently citrus greening disease has been recorded in four municipalities in the state of Guerrero (Acapulco, Florencio Villareal, La Unión Isidoro Montes de Oca, Petatlán) (SENASICA, 2014); Atoyac de Álvarez, with high values of indices IRPM and IDCF (Tables 2 and 3), remains free of the pathogen, the more proximity between Acapulco and Petatlán; be of interest to follow at least the intensity of the disease for development in an area that apparently favors high vector abundance. A similar response occurs prior to the state of Chiapas, where HLB infections in the cities of Palenque, Ocosingo, Marqués de Comillas, and Father of the Americas (SENASICA, 2014) exist. Pichucalco (IGP high) and Tuzantán (maximum IDCF) (Tables 1 and 2) are free of HLB.

On the presence of the disease in Chiapas, the fact remains that it lacks a clear pattern of the epidemic associated with the natural flow of the vector potential, since the municipalities concerned are distant (SENASICA, 2014); is likely to anthropocentric components were related to the occurrence of the disease in the affected areas. These factors are not yet included in the model, since it is difficult to distinguish a trends that could influence become valid data for the system because they can generally occur in accidental, circumstantial or occur in a very disjointed ways, and are indeed difficult to compare such with the information analyzed Gottwald *et al.* (2013) to detect the disease in urban areas in the United States.

Model predictions could be improved with the addition of other variables; e.g. rainfall, relative humidity, wind direction and speed, and crop phenology, especially bud stage of vegetative buds, which is the phase of increased risk of infestation by *D. citri* (Albrigo and Hall, 2007; Hall *et al.*, 2013).

For the anthropocentric factors, we must seek a way to gauge their influence. Also, we will need to include and assign a weighting to potential pathways for invasive species; for example, initial detections of HLB-infected trees occurred in areas near tourist areas or seaports trade (Península of Yucatán, Puerto Vallarta, Jalisco, Nuevo Vallarta, Nayarit, Manzanillo, Colima, Mazatlán, Sinaloa. Baja California Sur and Acapulco, Guerrero (SENASICA, 2014) While it might

Parte de la información que podría considerarse de relevancia notoria en el presente estudio, es lo relacionado con la Cota altitudinal. En los mapas generados (Figura 2, 3 y 5) es posible observar que se produce un área clara, donde el desarrollo del insecto es limitado por el descenso en temperatura asociado con altitud y finalmente también por la ausencia de posibles hospederos (Figura 4 y 5). La información permite considerar explorar el establecimiento de cítricos que toleren condiciones frescas que sean adversas para el desarrollo del vector del Huanglongbing; esta estrategia ha sido utilizada con éxito en la citricultura de África y Asia, principalmente en China (da Graca, 1991; National Research Council, 2010). Será necesario validar la información de desarrollo del vector en esas zonas del país e iniciar a experimentar especies citrícolas con potencial para establecerse.

Es importante mencionar que los datos necesarios para efectuar la metodología propuesta en el presente estudio, son de fuentes públicas y de acceso fácil, su modelación es sencilla y práctica, requiere un mínimo de variables, sus cálculos matemáticos son sencillos y los procesos de fácil comprensión, esto a diferencia de otras metodologías como la propuesta por López-Collado *et al.* (2013), quienes utilizaron MaxEnt, un programa inductivo, de aprendizaje-máquina que emplea capas bioclimáticas y datos puntuales de localización. Estos autores, consideraron 19 capas bioclimáticas como entrada a su modelo, y aún con esta información, los resultados indicados son similares a los obtenidos en el presente estudio.

A pesar de la sencillez de nuestra metodología, el modelo obtenido también se considera que generó mejores predicciones que las producidas por Gutiérrez y Luigi (2013) para el país; sin embargo, su estudio quizás por carecer de información climática regional, genera áreas que distan del escenario real que se registra en el país sobre presencia de Huanglongbing (SENASICA, 2014). Torres-Pacheco *et al.* (2013) aplicaron una metodología similar a la presente, considerando la presencia potencial de brotes vegetativos y la duración del periodo de crecimiento propuesto por FAO, con lo que logran aproximaciones relativamente más acordes a escenarios reales (SENASICA 2014).

Los estudios arriba indicados contribuyen a establecer las bases para integrar la modelación de riesgo, la cual ha sido hasta cierto punto desatendida en México, no obstante ser parte fundamental en la planeación e implementación

be relatively late for the case of citrus greening disease, the methodology is considered to serve to enforce the law against the threats that exist on domestic agriculture (Pimentel *et al.*, 2005; Hlasny, 2011; SENASICA, 2014).

In the current state of the model, its potential is undeniable contribution to planning for regional management that has come to solve the problem (Bassanezi *et al.*, 2013; SENASICA, 2014).

Some of the information that could be considered of notorious relevance in the present study is related to the altitudinal dimension. The maps generated (Figures 2, 3 and 5) one can observe a clear area where insect development is limited by the decrease in temperature associated with altitude and finally also by the absence of possible hosts (Figures 4 occurs and 5). The information allows us to consider exploring the establishment of citrus tolerate cool conditions that are unfavorable for the development of vector citrus greening disease; this strategy has been used successfully in the citrus industry in Africa and Asia, mainly in China (da Graca, 1991, National Research Council, 2010). Will be necessary to validate the information vector development in those areas of the country and start experimenting citrus species with potential to become established.

It is noteworthy that, the data required for the methodology proposed in this study are from public sources and easily accessible, its modeling is simple and practical, requires a minimum of variables, their mathematical calculations are simple and easy to understand the processes, that unlike other methodologies as proposed by López-Collado *et al.* (2013) who used MaxEnt, an inductive program learning-machine employing bioclimatic layers and point location data. These authors considered 19 bioclimatic layers as input to the model, and even with this information, the results reported are similar to those obtained in the present study.

Despite the simplicity of our methodology, the model obtained is also considered that generated better predictions than those produced by Gutiérrez and Luigi (2013) for the country; however, their study perhaps due to lack of regional climate information, creates areas that are far from the actual scenario that is recorded in the country about presence of HLB (SENASICA, 2014). Torres-Pacheco *et al.* (2013) applied a similar methodology to this, considering the potential presence of vegetative shoots and duration proposed by FAO growing period, thereby having relatively more suited to real scenarios (SENASICA, 2014) approaches.

de campañas de detección de enfermedades o control de poblaciones de plagas implementadas por instituciones enfocadas a esto como es el Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (SENASICA) en México.

La modelación puntual y espacial de zonas de riesgo es fundamental en el entendimiento de la presencia potencial de cualquier plaga o enfermedad. Su cálculo puede ser de lo más sencillo considerando alguna variable, hasta lo más complicado integrando un complejo de variables y técnicas estadísticas y computacionales sofisticadas. Mediante el uso de la variable temperatura y la presencia potencial de hospederos, detectados mediante las zonas sembradas de cítricos, se obtuvo una representación cartográfica digital y una primera aproximación a la modelación de la presencia potencial de *D. citri* en México. Los resultados obtenidos podrían coadyuvar a la definición de protocolos de detección de hospedantes y/o árboles infectados por HLB, prever su infestación posible y monitorear su dispersión, y mediante su aprovechamiento en la planeación para la toma de decisiones, contribuir a optimizar el recurso económico y humano contemplado para el manejo del problema en el país.

## Conclusiones

La modelación puntual y espacial de zonas de riesgo es fundamental en el entendimiento de la presencia potencial de cualquier plaga o enfermedad. Su cálculo puede ser de lo más sencillo considerando alguna variable, hasta lo más complicado considerando un complejo de variables y técnicas estadísticas y computacionales sofisticadas. Mediante el uso de la variable temperatura y la presencia potencial de hospederos, detectados mediante las zonas sembradas de cítricos, se obtuvo una representación cartográfica digital y una primera aproximación a la modelación de la presencia potencial de *D. citri* en México. Los resultados obtenidos podrían contribuir a la definición de protocolos de detección de hospedantes y/o árboles infectados por HLB, prever su infestación posible y monitorear su dispersión. Este modelo podría mejorarse incluyendo otras variables del clima y la fenología de cultivo, para lo cual es imprescindible su calibración, validación y significancia estadística.

The above studies help to establish the foundation for integrating a risk modeling, which has been somewhat neglected in Mexico, despite being a fundamental part in the planning and implementation of campaigns detection of disease or pest population control implemented by institutions focused on this as it is the National Health Service, Food Safety and Quality (NSAFHSQ) in Mexico.

Timely and spatial modeling of risk areas is central to the understanding of the potential presence of any pest or disease. Its calculation can be as simple as considering some variable, even the most complicated variables integrating complex computational and statistical techniques and sophisticated. By using the temperature variable and the potential presence of hosts, detected by the citrus planted areas, a digital map display and a first approach to the modeling of the potential presence of *D. citri* in Mexico was obtained. The results could contribute to the definition of host discovery protocols and HLB-infected trees, provide a possible infestation and monitor their dispersion and by its use in planning for decision making, help optimize the economic and human resource referred for management of the problem in the country.

## Conclusions

Specific and spatial modelling of risk areas is central to the understanding of the potential presence of any pest or disease. Its calculation can be as simple as considering some variable, even the most complicated variables considering a complex computational and statistical and sophisticated techniques. Using the temperature variable and the potential presence of hosts, detected by the citrus planted areas, a digital map display and a first approach to the modelling of the potential presence of *D. citri* in Mexico was obtained. The results could contribute to the definition of host discovery protocols and HLB-infected trees, provide a possible infestation and monitor its spread. This model could be improved by including other variables of climate and crop phenology, which is essential for calibration, validation and statistical significance.

*End of the English version*



## Agradecimientos

Los resultados presentados, fueron financiados por los fondos para la investigación del proyecto FONSEC SAGARPA-CONACYT, número: 2009-108591.

## Literatura citada

- Aurambout, J. P.; Finlay, K. J.; Luck, J.; Beattie, G. A. C. 2009. A concept model to estimate the potencial distribution of the Asiatic citrus psyllid (*Diaphorina citri* Kuwayama) in Australia under climate change- A means for assessing biosecurity risk. *Ecol. Modell.* 220:2512-2524.
- Bassanezi, R. B.; Montesino, L. H.; Gimenes-Fernandes, N.; Yamamoto, P. T.; Gottwald, T.; Amorim, L. and Bergamin Filho, A. 2013. Efficacy of area-wide inoculum reduction and vector control on temporal progress of Huanglongbing in young sweet orange plantings. *Plant Dis.* 97:789-796.
- Bové, J. M. 2006. Huanglongbing: a destructive, newly-emerging, century-old disease of citrus. *J. Plant Path.* 88:7-37.
- Bové, J. M. and Garnier, M. 2002. Phloem-and xylem-restricted plant pathogenic bacteria. *Plant Sci.* 163(6):1083-1098.
- Burrough, P. 1997. Principles of geographical information systems, Oxford University Press. Oxford, UK. 332 p.
- da Graca, J. V. 1991. Citrus greening disease. *Annu. Rev. Phytopathol.* 29:109-136.
- da Graca, J. V. and Korsten, L. 2004. Citrus Huanglongbing: review, present status and future strategies. *In: Naqvi, S. A. M. H. (Ed.). Diseases of fruits and vegetables.* Kluwer Academic Publishers. The Netherlands. 1: 229-245.
- Díaz, G. y Cortina, M. F. 2010. Sistema de Información Climática del INIFAP (SIClima-INIFAP). INIFAP. Centro de Investigación Regional Golfo Centro. Campo Experimental Xalapa. Xalapa, Veracruz. México. 7-9 pp.
- Flores, R.; Robles, M. M.; Velázquez, J. J. y Manzanilla, M. A. 2010. Situación actual del Huanglongbing (HLB) en limón mexicano bajo las condiciones agroecológicas de Colima. *In: Robles, M. M. V.M.; Medina, V. M.; Velázquez, J. J. y Manzanilla, M. A. (Ed.) Memorias del Primer Simposio Internacional sobre Mejoramiento Genético de Cítricos.* Tecoman, Colima. México. 1-20.
- Gottwald, T. R.; da Graça, J. V. and Bassanezi, R. B. 2007. Citrus Huanglongbing: the pathogen and its impact. Online. *Plant Health Progress* doi:10.1094/PHP-2007-0906-01-RV.
- Gottwald, T.; Luo, W. and McRoberts, N. 2013. Risk-based residential HLB/ACP survey for California, Texas and Arizona. *In: proceedings of the 3<sup>th</sup> International Research Conference on Huanlongbing-IRCHLB III.* February 4-8 2013. Orlando, Florida, USA. 43-47 pp.
- Gutierrez, P.A. and Ponti, L. 2013. Prospective analysis of the geographic distribution and relative abundance of Asian citrus psyllid (Hemiptera: Liviidae) and citrus greening disease in North America and the Mediterranean Basin. *Florida Entomol.* 96(4):1375-1391.
- Halbert, S. E. and Manjunath, K. L. 2004. Asian citrus psyllids (Sternorrhyncha: Psyllidae) and greening disease of citrus: a literature review and assessment of risk in Florida. *Fl. Entomol.* 87(3):401-402.
- Hall, D. G. and Albrigo, L. G. 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.; Richardson, M. L.; Ammar, E.-D. and Halbert, S. E. 2013. Asian citrus psyllid, *Diaphorina citri*, vector of citrus Huanglongbing disease. *Entomol. Exp. App.* 146:207-223.
- Hlasny, V. 2011. The stock of invasive insect species and its economic determinants. *J. Econ. Entomol.* 104:764-772.
- Johnston, K. J.; Ver Hoef, M.; Krivoruchko, K. and Lucas, N. 2001. Using ArcGis geostatistical analyst. ESRI. New York, United States of America. 300 p.
- Liu, Y. H. and Tsai, J. H. 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-Collado, J.; López-Arroyo, J. I.; Robles-García, P. L. and Márquez-Santos, M. 2013. Geographic distribution of habitat, development, and population growth rates of the Asian citrus psyllid *Diaphorina citri* in Mexico. *J. Insect Sci.* 13(114):1-17.
- Medina, V. M.; Zapian, G.; Robles, M. M.; Pérez, O.; Orozco, M.; Williams, T. y Becerra, R. 2007. Fenología, eficiencia productiva y calidad de fruta de cultivares de Naranja en el trópico seco de México, *Rev. Fitotec. Mex.* 30:133-143.
- Moschini, R. C.; Heit, G. E.; Conti, H. A.; Cazenave, G. y Cortese, L. 2010. Riesgo agroclimático de las áreas cítricas de Argentina en relación a la abundancia de *D. citri*. SENASA. Buenos Aires, Argentina. 14 p.
- National Research Council (NRC). 2010. Strategic planning for the Florida citrus industry: addressing citrus greening disease. Washington, D.C. The National Academies Press. 1-4 pp.
- Nava, D. E.; Torres, M. L. G.; Rodríguez, M. D. L.; Bento, J. M. S. and Parra, J. R. P. 2007. Biology of *Diaphorina citri* (Hem., Psyllidae) on different hosts and at different temperatures. *J. Appl. Entomol.* 131(9-10):709-715.
- Oliver, J. E. 2005. Encyclopedia of world climatology (encyclopedia of earth sciences series). Springer. New York. 315 p.
- Pimentel, D.; Zuniga, R. and Morrison, D. 2005. Update on the environmental and economic costs associated with alien-invasive species in the United States. *Ecol. Econom.* 52(3):273-288.
- Portal frutícola. 2014. Entrevista al Dr. Renato B. Bassanezi. Fundecitrus. Sao Paulo presume de su éxito en la lucha contra el HLB.
- Robles-González, M. M.; Velázquez-Monreal, J. J.; Manzanilla-Ramírez, M. Á.; Orozco-Santos, M.; Medina-Urrutia, V. M.; López-Arroyo, J. I. y Flores-Virgen, R. 2013. Síntomas del Huanglongbing (HLB) en árboles de limón mexicano [*Citrus aurantifolia* (Christm) Swingle] y su dispersión en el estado de Colima, México. *Rev. Chapingo.* 19(1):15-31.
- Rocha-Peña, M. A.; Lee, R. F.; Lastra, R.; Niblett, C. L.; Ochoa-Corona, F. M.; Garnsey, S. M. and Yokomi, R. K. 1995. Citrus tristeza virus and its aphid vector *Toxoptera citricida*: Threats to citrus production in the Caribbean and Central and North America. *Plant. Dis.* 79:437-443.



- Roistacher, C. N and Bar-Joseph, M. 1987. Aphid transmission of citrus tristeza virus: a review. *Phytophylactica* 19:163-167.
- Román, M. P.; Cambra, M.; Juárez, J.; Duran, N.; Tanaka, F. A. O.; Alves, E.; Kitajima, E. W.; Yamamoto, P. T.; Bassanezi, R. B.; Teixeira, D. C.; Jesus, W. C.; Ayres, A. J.; Gimenes, N.; Rabenstein, F. and Giroto, L. F. 2004. Sudden death of citrus in Brazil: a graft-transmissible bud union disease. *Plant Dis.* 88(5):453-467.
- Salcedo, D.; Hinojosa, R.; Mora, G.; Covarrubias, I.; DePaolis, F.; Cántora, F. y Mora, S. 2010. Evaluación del impacto económico de Huanglongbing (HLB) en la cadena citrícola mexicana. IICA-SAGARPA-SENASICA. México. 146 p.
- Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (SENASICA). 2014. Huanglongbing de los cítricos. <http://www.senasica.gob.mx/?id=4608>.
- Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). 2014. Datos de superficie plantada de cítricos. <http://www.siap.gob.mx/>.
- Thohirah, A.; Hajivand, S.; Kamaruzaman, S. and Siti Nor, A. A. 2009. Control of Huanglongbing (HLB) disease with reference to its occurrence in Malaysia . *Afr. J. Biotech.* 8(17):4007-4015.
- Torres-Pacheco, I.; López-Arroyo, J. I.; Aguirre-Gómez, J. A.; Guevara-González, R. G.; Yáñez-López, R.; Hernández-Zul, M. I. and Quijano-Carranza, J. A. 2013. Potential distribution of *Diaphorina citri* (Hemiptera: Psyllidae) vector of huanglongbing in Mexico. *Fl. Entomol.* 96(1):36-47.
- Torres, R. E. 1995. *Agrometeorología*. 3ª. edición. Trillas. México. 70 p.