

MODELOS DE PREDICCIÓN FENOLÓGICA PARA MAÍZ BLANCO (*Zea mays* L.) Y GUSANO COGOLLERO (*Spodoptera frugiperda* J. E. Smith)

PHENOLOGICAL PREDICTION MODELS FOR WHITE CORN (*Zea mays* L.) AND FALL ARMYWORM (*Spodoptera frugiperda* J.E. Smith)

J. Benigno Valdez-Torres*, Federico Soto-Landeros, Tomás Osuna-Enciso, M. Alonso Báez-Sañudo

Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A. C. Carretera a El Dorado, Km 5.5, 80129, Culiacán, Sinaloa.

RESUMEN

Las pérdidas de producción de maíz en el mundo, atribuidas a plagas y enfermedades, representan alrededor de 31 % en la agricultura y la principal plaga es el gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda* J. E. Smith). El objetivo del presente estudio fue desarrollar y evaluar modelos fenológicos para maíz blanco y gusano cogollero que permitan establecer una estrategia de prevención del daño en el cultivo. Para determinar las temperaturas umbrales en cada etapa de desarrollo del gusano cogollero se usó una cámara bioclimática y un diseño experimental de un factor (temperatura) totalmente al azar, con 8, 10, 27, 38 y 40 °C. Se ajustaron polinomios de segundo grado para la tasa de desarrollo en función de la temperatura y matemáticamente se determinaron las siguientes temperaturas umbrales mínima y máxima: 8.7 y 39.8 °C. Para estudiar el desarrollo fenológico del cultivo y la plaga se establecieron dos parcelas experimentales con maíz blanco (Pioneer 30P49®) en el Valle de Culiacán, Sinaloa, México, una en el ciclo 2008-2009 y la otra en el ciclo 2009-2010. Ambas parcelas recibieron el mismo manejo, sin control de plagas y enfermedades, y se registraron las etapas fenológicas del cultivo y la plaga. Desde la fecha de siembra, las temperaturas diarias se registraron en una estación meteorológica instalada en cada parcela. Las etapas del cultivo y la plaga contra los grados días acumulados se ajustaron con polinomios de tercer grado ($R^2 > 95\%$). Estos modelos se analizaron conjuntamente para determinar las etapas fenológicas (del cultivo y la plaga) donde la plaga puede dañar al cultivo.

Palabras clave: modelos, predicción, *Zea maíz* L., *Spodoptera frugiperda* J. E. Smith.

ABSTRACT

The loss of maize production in the world, attributed to pests and diseases, represents about 31 % in agriculture. and the main pest is the fall armyworm (*Spodoptera frugiperda* J. E. Smith). The objective of this study was to develop and evaluate phenological models for white maize and fall armyworm required to produce a strategy to prevent crop damage. To determine the threshold temperatures at each stage of development of the fall armyworm a growth chamber and a completely randomized one factor (temperature) experimental design were used, with 8, 10, 27, 38 and 40 °C. Quadratic polynomials were adjusted for the rate of development in terms of temperature and the following minimum and maximum threshold temperatures were mathematically determined: 8.7 and 39.8 °C. To study the phenological development of the crop and pest, two experimental plots with white maize (Pioneer 30P49®) were established in the Valley of Culiacán, Sinaloa, Mexico; one in the 2008-2009 cycle and the other in that of 2009-2010. Both plots received the same agronomic management, without control of pests and diseases, and the phenological stages of the crop and pest were recorded. From the date of sowing, daily temperatures were recorded by a weather station installed at each plot. The stages of the crop and pest against accumulated degree days were adjusted by third-degree polynomials ($R^2 > 95\%$). These models were concurrently analyzed to determine the phenological stages (crop and pest) where the pest can cause crop damage.

Keywords: modeling, forecasting, *Zea maize* L., *Spodoptera frugiperda* J. E. Smith.

INTRODUCTION

One of the most important crops in the world is maize (*Zea mays*). In the 2009-2010 period, the world production was

* Autor responsable ♦ Author for correspondence.

Recibido: septiembre, 2011. Aprobado: abril, 2012.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 46: 399-410. 2012.

INTRODUCCIÓN

Uno de los cultivos más importantes en el mundo es el maíz (*Zea mays*). En el periodo 2009-2010 la producción mundial fue 976 446 millones t, y los principales productores fueron EE.UU., China, la UE y Brasil; México aportó 22 millones t, 2.8 % de la producción mundial (USDA, 2010), y Sinaloa fue el principal estado productor con 5.2 millones t, 22 % del total (SIAP, 2009).

A pesar de la disponibilidad de mejores prácticas agronómicas para la protección de cultivos, hay pérdidas de 31 % de la producción de maíz en el mundo debido a plagas y enfermedades (Oerke, 2006). En Sinaloa, el daño promedio en maíz debido a plagas y enfermedades es 30 %, un poco más de 1 millón t con un valor de 2800 millones de pesos (SIAP, 2009). Para mitigar estas pérdidas se enfatiza el manejo del cultivo a través de aspectos relacionados con el suelo, la nutrición, el clima y el control de plagas y enfermedades (Poisot *et al.*, 2004).

La relación entre las variables meteorológicas y el desarrollo de plagas y enfermedades se ha estudiado (Gillespie y Sentelhas, 2008). En particular, la tasa de desarrollo de cultivos, plagas y enfermedades, en función de la temperatura ambiental permite calcular sus temperaturas umbrales máximas y mínimas, y sus temperaturas óptimas de desarrollo (Zalom *et al.*, 1983). Con esta información es posible construir modelos matemáticos del desarrollo fenológico para cultivos, plagas y enfermedades en función de sus requerimientos térmicos (Damos y Savopoulou-Soultani, 2012), los cuales permiten pronosticar eventos desfavorables para el cultivo, a través del monitoreo de variables meteorológicas como temperatura, radiación y humedad relativa (Agrawal y Mehta, 2007).

La disponibilidad de redes satelitales y estaciones meteorológicas facilita el registro de datos meteorológicos; además hay gran capacidad de almacenamiento y cálculo mediante las tecnologías computacionales. Esto permite formular y evaluar modelos para el desarrollo del cultivo, plagas y enfermedades en función de variables meteorológicas, un aspecto importante para la agricultura actual.

Los objetivos de este estudio fueron: 1) proponer modelos polinomiales para estimar el desarrollo fenológico de maíz y gusano cogollero en función de la

976 446 million t, and the main producers were the USA, China, European Union and Brazil. México contributed 22 million t, 2.8 % of world production (USDA, 2010), and Sinaloa was the largest producing state with 5.2 million t, 22 % of the total (SIAP, 2009).

Despite the availability of better agronomic practices for crop protection, losses of 31 % in maize production are recorded worldwide due to pests and diseases (Oerke, 2006). In Sinaloa, the average damage in maize due to pests and diseases is 30 %, slightly more than 1 million t, worth 2800 million pesos (SIAP, 2009). To mitigate these losses, crop management has been emphasized through soil-related issues, nutrition, climate, and control of pests and diseases (Poisot *et al.*, 2004).

The relationship between meteorological variables and the phenological development of pests and diseases has been a subject of study (Gillespie and Sentelhas, 2008). In particular, the development rate of crops, pests, and diseases, depending on the environment temperature, allows estimate their maximum and minimum threshold temperatures, and their optimum development temperatures (Zalom *et al.*, 1983). With this information, it is possible to construct mathematical models of phenological development for crops, pests, and diseases based on their heat requirements (Damos and Savopoulou-Soultani, 2012), which allow to predict adverse events during crop development, by monitoring environmental variables such as temperature, radiation and relative humidity (Agrawal and Mehta, 2007).

The availability of satellite networks and weather stations facilitate recording meteorological data; besides, there is a large storage and calculation capacity provided by computer technology. This allows the development and validation of mathematical models for crops, pests, and diseases as a function of meteorological variables, which is an important aspect of today's agriculture.

The objectives of this study were: 1) to propose polynomial models to estimate the phenological development of maize and fall armyworm as a function of temperature, and 2) to point out the usefulness of these models as a tool to predict risk stages of attack by armyworms based on the phenological development of maize.

temperatura ambiental y 2) indicar la utilidad de estos modelos como una herramienta para pronosticar etapas de riesgo de ataque por gusano cogollero en función del desarrollo fenológico del maíz.

MATERIALES Y MÉTODOS

Experimento 1

Se recolectaron oviposturas, larvas y pupas de gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda* L.) en una parcela de maíz (Pioneer 30P49[®]) establecida en la Facultad de Agronomía (24° 37' 14.7" N, 107° 26' 38.7" O; 20 msnm) de la Universidad Autónoma de Sinaloa. Después se realizó un experimento para determinar las temperaturas umbrales del gusano cogollero en el Laboratorio de Toxicología del Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo (CIAD), Coordinación Culiacán (24° 44' 01.3" N, 107° 27' 16.4" O; 26 msnm). Grupos de tres muestras, de 30 huevecillos se colocaron en cajas petri sobre papel secante humedecido con agua destilada y se llevaron a una cámara bioclimática (Biotronette, Mark II). Cada grupo fue colocado a 8, 10, 27, 38 y 40 °C (Simmons, 1993) hasta la eclosión o muerte de los huevecillos. Se registraron los huevecillos eclosionados por caja.

Para cada uno de los seis instares del gusano cogollero, tres muestras de 20 larvas se depositaron individualmente en vasos de polietileno de 100 mL con tapa perforada, cubiertos con una malla. Luego se colocaron en la cámara bioclimática y se alimentaron con plántulas de maíz. Se registró el porcentaje de supervivencia de larvas por muestra.

Tres muestras, de 15 pupas se depositaron individualmente en vasos de polietileno de 100 mL con tapa perforada cubiertos con una malla y se colocaron en la cámara bioclimática. Se registró la supervivencia por muestra (Simmons, 1993).

El fotoperiodo para todos los casos fue de 12 h luz y 12 h oscuridad, con humedad relativa de 60-70 %.

Análisis estadístico

Para estimar las temperaturas umbrales de cada etapa fenológica (huevecillo, larva y pupa), se utilizó un diseño experimental de un factor (temperatura) totalmente al azar, con cinco niveles (8, 10, 27, 38 y 40 °C) y tres réplicas por tratamiento. Se ajustó un modelo de regresión polinomial de segundo grado para la tasa de desarrollo, expresada como porcentaje de huevecillos eclosionados (porcentaje de supervivencia para larva y pupa) en función de la temperatura (Simmons, 1993). La significancia de parámetros se determinó con $p \leq 0.05$. Los datos se analizaron con MINITAB 15.0.

MATERIALS AND METHODS

Experiment 1

We collected egg masses, larvae and pupae of fall armyworm (*Spodoptera frugiperda* L.) in a maize plot (Pioneer 30P49[®]) established at the Faculty of Agronomy (24° 37' 14.7" N, 107° 26' 38.7" W, 20 masl) of the Autonomous University of Sinaloa. Then, an experiment in was carried out at Laboratory of Toxicology of the Research Center for Food and Development (CIAD), Culiacán Coordination (24° 44' 01.03" N, 107° 27' 16.4" W, 26 masl) to determine the threshold temperatures of fall armyworm. Groups of three samples of 30 eggs each were placed in petri dishes on blotting paper moistened with distilled water and taken to a growth chamber (Biotronette, Mark II). Each group was placed at 8, 10, 27, 38, and 40 °C (Simmons, 1993) until hatching or death of the eggs. The hatched eggs per box was recorded.

For each of the six instars of fall armyworm, we individually placed three samples of 20 larvae in 100 mL polyethylene vessels with perforated lid, covered with a mesh. Then we put them in the growth chamber and fed them with maize seedlings. We recorded the survival rate of larvae per sample.

Three samples of 15 pupae were individually placed in 100 mL polyethylene vessels, covered with a perforated lid mesh, and placed in the growth chamber. The survival rate per sample (Simmons, 1993) was recorded.

The photoperiod for all cases was 12 h light and 12 h darkness, with relative humidity of 60 to 70 %.

Statistical analysis

To estimate the threshold temperatures at each phenological stage (egg, larva and pupa), a one factor (temperature) completely randomized design was used, with five treatments (8, 10, 27, 38, and 40 °C) and three replicates per treatment. A second-degree polynomial regression was adjusted for the rate of development, expressed as a percentage of eggs hatched (percentage of survival for larvae and pupae) depending on temperature (Simmons, 1993). The significance of parameters was determined with $p \leq 0.05$. The data were analyzed using MINITAB 15.0

Experiment 2

Two experimental plots (0.5 ha) of maize (Pioneer 30P49[®]) were set up; one at the Ejido San Pedro, Culiacán (24° 25' 56" N, 107° 30' 30" W, 26 masl) during the agricultural cycle 2008-2009, and the other one in the Faculty of Agronomy of the Universidad Autónoma de Sinaloa (24° 37' 14.7" N, 107° 26'

Experimento 2

Se establecieron dos parcelas experimentales (0.5 ha) con maíz (Pioneer 30P49[®]), una en el ejido San Pedro, Culiacán (24° 25' 56" N, 107° 30' 30" O: 26 msnm) durante el ciclo agrícola 2008-2009 y la otra en la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Sinaloa (24° 37' 14.7" N, 107° 26' 38.7" O; 20 msnm) durante el ciclo agrícola 2009-2010. Los cultivos se establecieron con una distancia de 10 cm entre plantas y de 80 cm entre surcos, recibiendo el mismo manejo agronómico: preparación de terreno, riego, siembra, fertilización y sin control de plagas y enfermedades (Meza-Ponce y Angulo-Santos, 2008). Cada semana se registraron semanalmente las etapas fenológicas del cultivo (germinación, emergencia, desarrollo vegetativo, floración, llenado de grano y estado de mazorca) (Ritchie y Hanway, 1984) y de la plaga (eclosión de huevecillos, instares de las larvas y la duración del estado de pupa) (Capinera, 2001).

Las temperaturas ambientales diarias se registraron en una estación automatizada (Adcon Telemetry[®]) en cada una de las parcelas de maíz. El cálculo de los grados-día (°D) se realizó mediante el programa Degree Day Utility, versión 2.1, de la Universidad de California, Davis. Los °D acumulados para el maíz se calcularon mediante el método de seno doble (Zalom *et al.*, 1983), con temperaturas umbral mínima y máxima de 10 °C y 30 °C (Ruiz-Corral *et al.*, 2002), y con las temperaturas umbrales obtenidas del experimento 1 para el gusano cogollero.

Análisis estadístico

Se ajustó un polinomio de tercer grado en una variable con etapas fenológicas en función de grados días acumulados. Las etapas fenológicas del maíz se definieron mediante una escala decimal (Weber y Bleiholder, 1990; Lancashire *et al.*, 1991) (Cuadro 1). Para gusano cogollero se utilizó una escala arbitraria, siguiendo la metodología propuesta por el Centro Federal de Investigaciones Biológicas para la Agricultura y Silvicultura (BBCH, 2001) (Cuadro 2). El paquete estadístico MINITAB 15.0 se usó para el análisis de datos. La significancia de los modelos se determinó con $p \leq 0.05$.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Temperaturas umbrales y temperatura óptima para el ciclo del gusano cogollero

Para la etapa de eclosión, el polinomio de segundo grado ajustado fue $EH=85.9-0.387(T-24.6)^2$, ($R^2=0.88$), donde EH representa el porcentaje de eclosión de huevecillos iniciales. Las temperaturas

38.7" W, 20 masl) during the crop season 2009-2010. Crops were established with a distance of 10 cm between plants and 80 cm between rows and received the same agronomic management: land preparation, irrigation, planting, fertilizing and no control of pests and diseases (Meza-Ponce and Angulo-Santos, 2008). Phenological stages (germination, emergence, vegetative growth, flowering, grain filling and ear state) were recorded weekly (Ritchie and Hanway, 1984), as well as those of plague (hatching of eggs, larval instars and the duration of pupal stage) (Capinera, 2001).

Daily environmental temperatures were recorded in an automated station (Adcon Telemetry[®]) on each of the maize plots. The calculation of degree days (°D) was performed using the program Degree Day Utility, version 2.1, University of California, Davis. The accumulated °D for maize were calculated using the double sine method (Zalom *et al.*, 1983), with minimum and maximum threshold temperatures of 10 °C and 30 °C (Ruiz-Corral *et al.*, 2002), and with threshold temperatures obtained in experiment 1 for the fall armyworm.

Statistical analysis

A third degree polynomial in one variable was adjusted with phenological stages depending on the degree days accumulated. Maize phenological stages were defined using a decimal scale (Weber and Bleiholder, 1990; Lancashire *et al.*, 1991) (Table 1). For fall armyworm, we used an arbitrary scale, following the methodology proposed by the Centro Federal de Investigaciones Biológicas para la Agricultura y Silvicultura (Federal Biological Research Centre for Agriculture and Forestry) (BBCH, 2001) (Table 2). The statistical package MINITAB 15.0 was used for data analysis. The significance of the models was determined with $p \leq 0.05$.

Cuadro 1. Codificación de los estadios fenológicos del maíz. Table 1. Maize phenological stages coding.

Clave	Etapas
00	Siembra
10	Emergencia
20	Cuarta hoja
30	Octava hoja
40	Doceava hoja
50	Floración masculina
60	Floración femenina
70	Estigmas emergidos
80	Grano lechoso
90	Grano masoso
95	Madurez fisiológica
100	Trilla

Cuadro 2. Codificación de los estadios fenológicos del gusano cogollero.

Table 2. Fall armyworm phenological stages coding.

Clave	Etapa
00	Ovipostura
05	Eclósión de huevecillo
10	Larva 1 ^{er} instar
11	Larva 2 ^{do} instar
12	Larva 3 ^{er} instar
13	Larva 4 ^{to} instar
14	Larva 5 ^{to} instar
15	Larva 6 ^{to} instar
20	Pupa
30	Adulto

umbrales mínima y máxima y la temperatura óptima de eclósión, estimadas del modelo, fueron 9.7, 39.5 y 24.6 °C. Para la etapa de larva el polinomio ajustado fue $SL=91.84-0.948(T-24.6)-0.363(T-24.6)^2$, ($R^2=0.94$), donde SL representa el porcentaje de supervivencia de larvas. Las temperaturas umbrales mínima y máxima y la temperatura óptima de supervivencia de larvas, estimadas con el modelo, fueron 7.4, 39.2 y 25.9 °C. El modelo polinomial estimado para la etapa de pupa fue $SP=70.0-0.302(T-24.6)^2$, ($R^2=0.88$), donde SP representa el porcentaje de supervivencia de pupas. Las temperaturas umbrales mínima y máxima y la temperatura óptima de supervivencia de pupas, estimadas con el modelo, fueron 9.4, 39.8 y 24.6 °C. El valor 24.6 en cada modelo es un factor de corrección promedio para evitar el problema de colinealidad en la variable independiente (Montgomery *et al.*, 2004).

Las temperaturas umbrales mínimas y máximas y la óptima, calculadas como valores promedios de las tres etapas, fueron 8.7, 39.8 y 25 °C. Las gráficas de los modelos estimados para las etapas de huevecillo, larva y pupa aparecen en la Figura 1.

Fenología del cultivo de maíz y del gusano cogollero

De acuerdo con la descripción fenológica para maíz de Weber y Bleiholder (1990) y Lancashire *et al.* (1991), en los cultivos de ambas parcelas se identificaron 12 etapas fenológicas: siembra, emergencia, 4^a hoja verdadera, 8^{va} hoja verdadera, 12^{va} hoja verdadera, floración masculina, floración femenina, grano

RESULTS AND DISCUSSION

Threshold temperatures and optimum temperature for the fall armyworm cycle

For the hatching stage, a second-degree polynomial was adjusted: $EH=85.9-0.387(T-24.6)^2$, ($R^2=0.88$), where EH represents the percentage of early eggs hatching. The minimum and maximum threshold temperatures and the optimum temperature for hatching, estimated from the model, were 9.7, 39.5, and 24.6 °C. For the larval stage, the adjusted polynomial was $SL=91.84-0.948(T-24.6)-0.363(T-24.6)^2$, ($R^2=0.94$), where SL represents the percentage of larvae survival. The minimum and maximum threshold temperatures and the optimum temperature for larval survival, estimated from the model, were 7.4, 39.2 and 25.9 °C. The polynomial model estimated for the pupa stage was $SP=70.0-0.302(T-24.6)^2$, ($R^2=0.88$), where SP represents the percentage of pupae survival. The minimum and maximum threshold temperatures and the optimum

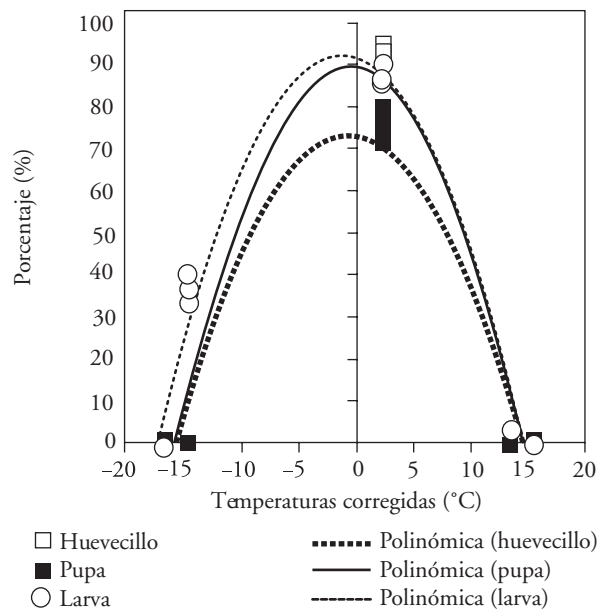


Figura 1. Temperaturas umbrales mínima y máxima, y óptima corregidas del porcentaje de desarrollo para el ciclo de gusano cogollero (huevecillo, larva y pupa).

Figure 1. Minimum and maximum threshold temperatures and optimum temperature corrected from the development percentage for the fall armyworm cycle (egg, larva and pupa).

acuoso, grano lechoso, grano masoso, madurez fisiológica y trilla. Debido a las diferencias climáticas y de suelo, estas etapas presentaron diferentes requerimientos térmicos por etapa y por parcela (Cuadro 3).

Los °D acumulados totales (constante térmica del cultivo) hasta madurez fisiológica, fueron 1458 °DA para el ciclo 2008-2009 y 1450 °DA para el ciclo 2009-2010, valores muy cercanos al de 1451 °D reportado por Ojeda-Bustamante *et al.* (2006). En los días calendario hubo diferencia de 8 d a madurez fisiológica entre los dos ciclos (134 d para el primero y 142 d para el segundo), lo cual puede atribuirse a condiciones meteorológicas diferentes de un ciclo a otro.

Según la codificación de las etapas fenológicas para el gusano cogollero (BBCH, 2001), las generaciones en la parcela de maíz del ciclo agrícola 2009-2010 presentaron 10 etapas fenológicas: 1) huevecillo, 2) eclosión, 3) larva 1^{er} instar, 4) larva 2^{do} instar, 5) larva 3^{er} instar, 6) larva 4^{to} instar, 7) larva 5^{to} instar, 8) larva 6^{to} instar, 9) pupa y 10) adulto (Capinera, 2001). Debido a las diferencias climáticas estas etapas presentaron diferentes requerimientos térmicos por generación. Es importante recalcar que el gusano cogollero presentó dos generaciones durante el cultivo de maíz; la primera durante el crecimiento vegetativo y la segunda durante la floración (Cuadro 4).

El requerimiento térmico para gusano cogollero sólo se registró durante el ciclo agrícola 2009-2010, y fue 506 °DA y 501 °DA para la primera y segunda generación. Estos valores son similares a los reportados para hembras (490 °DA) y para machos (543 °DA) de *Spodoptera exigua* (Hogg y Gutiérrez, 1980), un lepidóptero con ciclo biológico muy similar al gusano cogollero. En los días calendario hubo una diferencia de 14 d entre la primera (57 d) y la segunda generación (43 d) (Cuadro 4). La diferencia se debe a que la primera generación se presentó en la fase vegetativa del maíz en meses fríos (noviembre-enero) para el valle de Culiacán, Sinaloa; mientras que la segunda generación se presentó en la fase reproductiva del maíz y se desarrolló en meses cálidos (febrero-abril). A partir de la fecha de siembra, la primera generación del gusano cogollero se observó hasta los 112.7 °DA y en la segunda generación hasta los 614.3 °DA.

Modelo fenológico para el gusano cogollero

El modelo estimado para gusano cogollero, en °DA, fue: Etapa = 0.194 + 0.133 °DA - 0.000433

temperature for pupae survival, estimated with the model, were 9.4, 39.8 and 24.6 °C. The value 24.6 in each pattern is an average correction factor to avoid the problem of collinearity on the independent variable (Montgomery *et al.*, 2004).

The minimum and maximum threshold temperatures and the optimum temperature, calculated as mean values of the three stages were 8.7, 39.8, and 25 °C. The graphs of the estimated models for the stages of egg, larva and pupa are shown in Figure 1.

Phenology of maize and fall armyworm

According to the phenological description of maize by Weber and Bleiholder (1990) and Lancashire *et al.* (1991), in the crops, at both plots, 12 phenological stages were identified: planting, emergence, 4th true leaf, 8th true leaf, 12th true leaf, male flowering, silking, watery grain, milky grain, dough grain, physiological maturity, and threshing. Due to climatic and soil differences, these stages showed different thermal requirements per stage and per plot (Table 3).

The total accumulated °D (thermal constant of the crop) to physiological maturity were 1458 °DA for the cycle 2008-2009 and 1450 °DA for the 2009-2010 cycle. These values are very close to that of 1451 °D reported by Ojeda-Bustamante *et al.* (2006). There was a difference of 8 d in the calendar days, to physiological maturity between the two cycles (134 d

Cuadro 3. Grados-día acumulados (°DA) y tiempo cronológico (d) por etapa fenológica del cultivo de maíz.

Table 3. Accumulated degree-days (°DA) and chronological time (d) by phenological stage of maize.

Etapa	1er. ciclo		2do. ciclo	
	°DA	d	°DA	d
Siembra	0.0	0	0.0	0
Emergencia	118.7	10	106.7	12
4 hoja verdadera	328.1	29	334.9	36
8 hoja verdadera	518.8	49	506.7	54
12 hoja verdadera	580.4	54	564.7	61
Floración masculina	664.4	63	677.3	73
Floración femenina	810.1	79	821.3	88
Grano acuoso	985.6	94	979.8	103
Grano lechoso	1115.5	105	1100.4	114
Grano masoso	1250.3	117	1241.5	125
Madurez fisiológica	1458.0	134	1450.2	142

Cuadro 4. Fenología de dos generaciones de gusano cogollero con base en grados-días acumulados (°DA) y tiempo cronológico (d) durante el ciclo fenológico del maíz.

Table 4. Phenology of two generations of fall armyworm based on accumulated degree days (°DA) and chronological time (d) during the phenological cycle of maize.

Etapa	1er. generación		2da. generación	
	°DA	d	°DA	d
Postura	0.0	0	0.0	0
Eclósión	47.5	5	42.2	4
1er instar	89.6	9	84.1	8
2do instar	119.7	13	125.7	12
3er instar	150.2	17	146.7	14
4to instar	176.8	20	171.0	16
5to instar	205.5	23	210.5	19
6to instar	254.7	29	258.1	23
Pupa	384.7	44	378.7	33
Adulto	506.4	57	501.1	43

$^{\circ}\text{DA}^2 + 0.00000057^{\circ}\text{DA}^3$ ($R^2 = 0.996$). Todos los coeficientes del modelo fueron significativos ($p \leq 0.05$) (Figura 2).

Modelo fenológico para el cultivo de maíz

El modelo estimado para maíz blanco, en °DA, fue: $\text{Etapa} = 1.74 + 0.002^{\circ}\text{DA} + 0.00014^{\circ}\text{DA}^2 - 0.0000000697^{\circ}\text{DA}^3$ ($R^2 = 0.972$). Todos los coeficientes del modelo fueron significativos ($p \leq 0.05$) (Figura 3).

Análisis concurrente de los modelos fenológicos para maíz y cogollero

El daño al cultivo de maíz ocurre cuando el gusano cogollero se encuentra en la etapa larvaria (Santos *et al.*, 2003), la cual ocurre entre los valores clave de 10 a 15 (Cuadro 1). Sustituyendo estos valores en el modelo para el gusano cogollero:

$$\text{Etapa} = 0.194 + 0.133^{\circ}\text{DA} - 0.000433^{\circ}\text{DA}^2 + 0.00000057^{\circ}\text{DA}^3$$

se obtienen las ecuaciones:

$$10 = 0.194 + 0.133^{\circ}\text{DA} - 0.000433^{\circ}\text{DA}^2 + 0.00000057^{\circ}\text{DA}^3 \tag{1}$$

for the first and 142 d for the second), which can be attributed to different weather conditions from one cycle to another.

According to phenological stages for the fall armyworm (BBCCH, 2001), the generations in the maize plot of the crop season 2009-2010 had 10 phenological stages: 1) egg, 2) emergence, 3) 1st instar larvae, 4) 2nd instar larvae, 5) 3rd instar larvae, 6) 4th instar larvae, 7) 5th instar larva, 8) 6th instar larvae, 9) pupa and 10) adult (Capinera, 2001). Due to climatic differences, these stages showed different thermal requirements per generation. Importantly, the fall armyworm completed two generations during the cultivation of maize; the first during vegetative growth and the second during flowering (Table 4).

The thermal requirements for the fall armyworm were estimated only for the crop season 2009-2010, and they were 506 °DA and 501 °DA for the first and second generation. These values are similar to those reported for females (490 °DA) and males (543 °DA) of *Spodoptera exigua* (Hogg and Gutiérrez, 1980), a lepidopteran with a biological cycle very similar to the fall armyworm. There was a difference of 14 calendar days, between the first (57 d) and the second generation (43 d) (Table 4). The difference is because the first generation occurred in the vegetative stage of maize in cold months (November January) in the valley of Culiacán, Sinaloa; while the second generation was present at the reproductive stage of maize and developed in warm months (February to April). From the planting date, the first generation of fall armyworm was detected up to 112.7 °DA and in the second generation up to 614.3 °DA.

Phenological model for the fall armyworm

The estimated model for the fall armyworm, expressed in °DA was: $\text{Stage} = 0.194 + 0.133^{\circ}\text{DA} - 0.000433^{\circ}\text{DA}^2 + 0.00000057^{\circ}\text{DA}^3$, with $R^2 = 0.996$. All model coefficients were significant ($p \leq 0.05$) (Figure 2).

Phenological model for maize cultivation

The estimated model for white maize, in °DA was: $\text{Stage} = 1.74 + 0.002^{\circ}\text{DA} + 0.00014^{\circ}\text{DA}^2 - 0.0000000697^{\circ}\text{DA}^3$ ($R^2 = 0.972$). All model coefficients were significant ($p \leq 0.05$) (Figure 3).

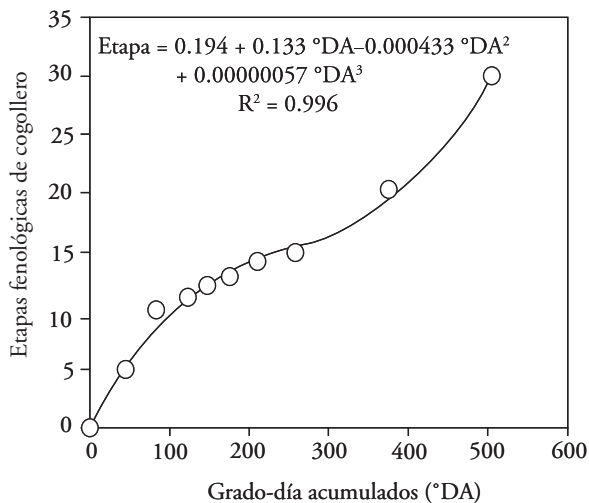


Figura 2. Modelo estimado por el método de mínimos cuadrados para gusanos cogolleros.

Figure 2. Model estimated by the least squares method for fall armyworms.

y

$$15 = 0.194 + 0.133 \text{ °DA} - 0.000433 \text{ °DA}^2 + 0.00000057 \text{ °DA}^3 \quad (2)$$

Resolviendo las ecuaciones (1) y (2) se obtiene: °DA=100.6 y °DA=210.6. Al tomar como tiempo cero el inicio del ciclo del maíz, la presencia de huevecillos en la primera generación se detectó a los 112.7 °DA (Figura 4), por lo que el intervalo de la etapa larvaria, en °DA, en la primera generación fue:

$$(100.6 + 112.7, 210.6 + 112.7) = (213.3, 323.3) \text{ °DA}$$

Al tomar como tiempo cero el inicio del ciclo del maíz, la presencia de huevecillos en la segunda generación se detectó a los 614.3 °DA (Figura 4), por lo que el intervalo de la etapa larvaria, en °DA, en la segunda generación fue:

$$(100.6 + 614.3, 210.6 + 614.3) = (714.9, 824.9) \text{ °DA.}$$

A partir del modelo ajustado para el desarrollo fenológico del cultivo de maíz: $\text{Etapa} = 1.74 + 0.002 \text{ °DA} + 0.00014 \text{ °DA}^2 - 0.000000697 \text{ °DA}^3$, los límites del intervalo (213.3, 323.3) °DA corresponden a las etapas:

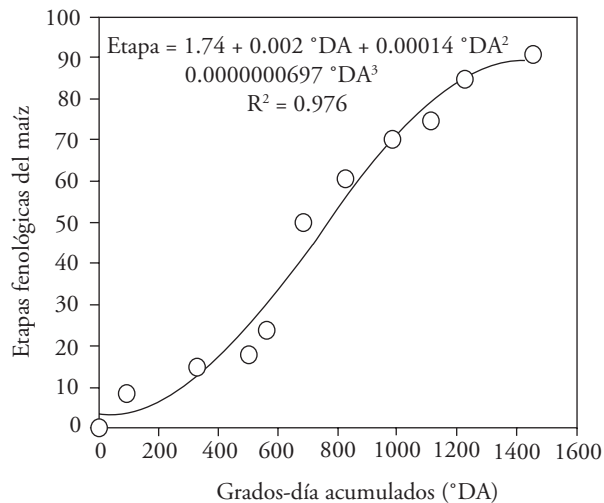


Figura 3. Modelo estimado, por el método de mínimos cuadrados para el cultivo de maíz.

Figure 3. Model estimated by the least squares method for maize crop.

Concurrent analysis of the phenological models for maize and fall armyworm

The damage to corn crop occurs when fall armyworm is in its larval stage (Santos *et al.*, 2003), which occurs between the scale values from 10 to 15 (Table 1). Substituting these values in the model for the fall armyworm:

$$\text{Stage} = 0.194 + 0.133 \text{ °DA} - 0.000433 \text{ °DA}^2 + 0.00000057 \text{ °DA}^3$$

the following equations are obtained:

$$10 = 0.194 + 0.133 \text{ °DA} - 0.000433 \text{ °DA}^2 + 0.00000057 \text{ °DA}^3 \quad (1)$$

and

$$15 = 0.194 + 0.133 \text{ °DA} - 0.000433 \text{ °DA}^2 + 0.00000057 \text{ °DA}^3 \quad (2)$$

Solving equations (1) and (2), we obtain: °DA=100.6 and °DA=210.6. By taking as zero time the beginning of the maize cycle, the presence of eggs in the first generation was detected at 112.7 °DA (Figure 4), so the interval of the larval stage, in °DA, in the first generation was:

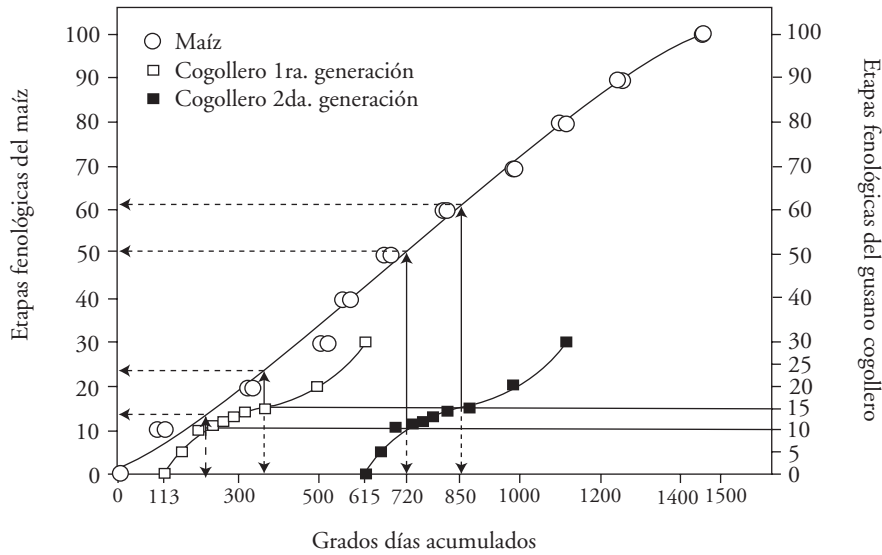


Figura 4. Concurrencia de los modelos del cultivo de maíz y del gusano cogollero.
Figure 4. Concurrency of maize crop and fall armyworm models.

$$\text{Etapa} = 1.74 + 0.002 (213.3) + 0.00014 (213.3)^2 - 0.0000000697 (213.3)^3 = 7.87$$

y

$$\text{Etapa} = 1.74 + 0.002 (323.3) + 0.00014 (323.3)^2 - 0.0000000697 (323.3)^3 = 14.69.$$

El intervalo entre 7.87 y 14.69 corresponde a las etapas de emergencia y cuarta hoja del cultivo de maíz.

Similarmente, los límites del intervalo (714.9, 824.9) corresponden a las etapas:

$$\text{Etapa} = 1.74 + 0.002 (714.9) + 0.00014 (714.9)^2 - 0.0000000697 (714.9)^3 = 49.51$$

y

$$\text{Etapa} = 1.74 + 0.002 (824.9) + 0.00014 (824.9)^2 - 0.0000000697 (824.9)^3 = 59.92.$$

El intervalo entre 49.51 y 59.92 corresponde a las etapas de floración masculina y femenina del cultivo de maíz. (Figura 4). De acuerdo con la Figura 4, para la primera generación del gusano cogollero la etapa larvaria ocurre en el intervalo 213.3 a 323.3 °DA, el cual corresponde al intervalo 7.87 a 14.69 en la escala fenológica del maíz; correspondiente a emergencia y

$$(100.6 + 112.7, 210.6 + 112.7) = (213.3, 323.3) \text{ °DA}$$

By taking as zero time the beginning of the maize cycle, the presence of eggs in the second generation was detected at 614.3 °DA (Figure 4), so that the interval of the larval stage, in °DA in the second generation was:

$$(100.6 + 614.3, 210.6 + 614.3) = (714.9, 824.9) \text{ °DA.}$$

From the adjusted model for phenological development of maize cultivation: Stage = 1.74 + 0.002 °DA + 0.00014 °DA² - 0.0000000697 °DA³, the limits of the interval (213.3, 323.3) °DA correspond to the stages:

$$\text{Stage} = 1.74 + 0.002 (213.3) + 0.00014 (213.3)^2 - 0.0000000697 (213.3)^3 = 7.87$$

and

$$\text{Stage} = 1.74 + 0.002 (323.3) + 0.00014 (323.3)^2 - 0.0000000697 (323.3)^3 = 14.69.$$

The interval between 7.87 and 14.69 corresponds to the stages of emergency and fourth leaf of maize cultivation.

Similarly, the interval limits (714.9, 824.9) correspond to the stages:

cuarta hoja. En la segunda generación del gusano cogollero, la etapa larvaria ocurre en el intervalo 714.9 a 824.9 °DA, el cual corresponde al intervalo 49.51 a 59.92 °DA en la escala fenológica del maíz; correspondiente a floraciones masculina y femenina. Las etapas estimadas para el maíz, para el estado larvario del gusano cogollero en cada generación, corresponden con etapas de daño del cultivo en la práctica agrícola (Santos *et al.*, 2003).

Pronóstico a partir de los modelos fenológicos ajustados

Los modelos estimados permiten pronosticar las etapas fenológicas del cultivo y del gusano cogollero. Para ello sólo se requiere registrar desde la fecha de siembra las temperaturas máximas y mínimas ambientales y calcular °DA acumulados para el maíz y el gusano cogollero. Por ejemplo, si el cultivo de maíz se sembró en el tiempo cero y, de acuerdo con una estación meteorológica con área de influencia sobre el cultivo, 7 d después de la siembra los registros de las temperaturas máximas y mínimas ambientales permiten determinar 79.8 °DA, entonces desde el modelo para maíz:

$$\begin{aligned} \text{Etapa} &= 1.74 + 0.002 \text{ °DA} + 0.00014 \text{ °DA}^2 \\ &\quad - 0.0000000697 \text{ °DA}^3 \\ &= 1.74 + 0.002 (79.8) + 0.00014 (79.8)^2 \\ &\quad - 0.0000000697 (79.8) = 2.75 \end{aligned}$$

esto indica que el cultivo se encuentra en la etapa de germinación, mientras que todavía no hay presencia del gusano cogollero en la parcela (Cuadro 4).

Similarmente, si 10 d después de la fecha de siembra se han acumulado 196 °DA, a partir del modelo para maíz:

$$\begin{aligned} \text{Etapa} &= 1.74 + 0.002 \text{ °DA} + 0.00014 \text{ °DA}^2 \\ &\quad - 0.0000000697 \text{ °DA}^3 \\ &= 1.74 + 0.002 (196) + 0.00014 (196)^2 \\ &\quad - 0.0000000697 (196)^3 = 6.98 \end{aligned}$$

esto indica que el cultivo se encuentra en la etapa de emergencia. Para el gusano cogollero los grados días acumulados son 196–112.7=83.3 °DA. Sustituyendo en el modelo fenológico ajustado para el gusano cogollero se obtiene:

$$\begin{aligned} \text{Stage} &= 1.74 + 0.002 (714.9) + 0.00014 (714.9)^2 \\ &\quad - 0.0000000697 (714.9)^3 = 49.51 \end{aligned}$$

and

$$\begin{aligned} \text{Stage} &= 1.74 + 0.002 (824.9) + 0.00014 (824.9)^2 \\ &\quad - 0.0000000697 (824.9)^3 = 59.92. \end{aligned}$$

The interval between 49.51 and 59.92 corresponds to the stages of male and female flowering of the maize crop, (Figure 4). According to Figure 4, for the first generation of armyworm, the larval stage occurs in the interval 213.3 to 323.3 °DA, which corresponds to the interval 7.87 to 14.69 in maize phenological scale, corresponding to emergence and fourth leaf. In the second armyworm generation, the larval stage occurs in the interval 714.9 to 824.9 °DA, which corresponds to the interval 49.51 to 59.92 °DA in maize phenological scale, corresponding to male and female blooms. The stages estimated for maize and the larval stage of fall armyworm in each generation, correspond to stages of crop damage in agricultural practice (Santos *et al.*, 2003).

Forecast as from phenological models adjusted

The estimated models allow predicting the phenological stages of the crop and the fall armyworm. To do this, it is necessary to register from the date of planting the maximum and minimum environmental temperatures and estimate °DA accumulated for maize and fall armyworm. For example, if the maize crop was seeded at time zero and, according to a weather station with an area of influence on the crop, 7 d after planting the records of maximum and minimum temperatures allow to determine 79.8 °DA; from the model for maize:

$$\begin{aligned} \text{Stage} &= 1.74 + 0.002 \text{ °DA} + 0.00014 \text{ °DA}^2 \\ &\quad - 0.0000000697 \text{ °DA}^3 \\ &= 1.74 + 0.002 (79.8) + 0.00014 (79.8)^2 \\ &\quad - 0.0000000697 (79.8) = 2.75 \end{aligned}$$

this indicates that the crop is in the germination stage, while the fall armyworm is not present yet in the plot (Table 4).

Similarly, if 10 days after planting date 196 °DA have accumulated, from the model for maize:

Cuadro 4. Grados-día acumulados (°DA) reales y pronosticados para predecir las etapas de gusano cogollero y cultivo de maíz.
Table 4. Accumulated degree-days (°DA) actual and forecast to predict the stages of fall armyworm and maize crop.

	Días después de la fecha de siembra				Etapa fenológica	
	7	10	16	18	Maíz	Cogollero
Grados	79.8				Germinación	----
Días acumulados (°DA)		196.0	269.0	286.0	Eclósión de huevecillo	Larva 3 ^{er} instar
					2 ^{da} Hoja	Larva 4 ^{to} instar
					3 ^{ra} Hoja	

$$\begin{aligned} \text{Etapa} &= 0.194 + 0.133 \text{ } ^\circ\text{DA} - 0.000433 \text{ } ^\circ\text{DA}^2 \\ &\quad + 0.00000057 \text{ } ^\circ\text{DA}^3 \\ &= 0.194 + 0.133 (83.3) - 0.000433 (83.3)^2 \\ &\quad + 0.00000057 (83.3)^3 = 8.6 \end{aligned}$$

esto indica que el gusano cogollero se encuentra en la etapa de eclósión de huevecillo. Por tanto, a 10 d de la fecha de siembra no habría daño al cultivo.

En el Cuadro 4 se presentan los °DA, los cálculos anteriores y los pronósticos para 16 y 18 d después de la fecha de siembra. La larva estará en 3^{er} y 4^{to} instar, mientras que el cultivo estará en 2^{da} y 3^{ra} hoja, y se debe recomendar una acción preventiva para reducir el daño.

CONCLUSIONES

La temperatura umbral mínima promedio de desarrollo fue 8.7 °C, y la temperatura umbral máxima promedio de desarrollo fue 39.8 °C. El requerimiento térmico para el ciclo biológico del gusano cogollero fue 504 °DA, mientras que el requerimiento térmico del cultivo de maíz de siembra-madurez fisiológica fue 1454 °DA. Los modelos de regresión polinomial de tercer grado para el gusano cogollero y el cultivo de maíz fueron apropiados para calcular las etapas fenológicas en función del requerimiento térmico. Los modelos estimados para el cultivo y la plaga se pueden usar concurrentemente para pronosticar los puntos de riesgos para el cultivo en función del desarrollo fenológico y requerimientos térmicos.

LITERATURA CITADA

Agrawal, R., and S. C. Metha. 2007. Weather based forecasting of crop yields, pests and diseases - IASRI models. *J. Ind. Soc. Agric. Stati.* 61(2), 255-263.

$$\begin{aligned} \text{Stage} &= 1.74 + 0.002 \text{ } ^\circ\text{DA} + 0.00014 \text{ } ^\circ\text{DA}^2 \\ &\quad - 0.0000000697 \text{ } ^\circ\text{DA}^3 \\ &= 1.74 + 0.002 (196) + 0.00014 (196)^2 \\ &\quad - 0.0000000697 (196)^3 = 6.98 \end{aligned}$$

this indicates that the crop is in the emergence phase. For the fall armyworm, the accumulated degree days are 196–112.7 = 83.3 °DA. Substituting in the phenology model adjusted for the fall armyworm, we obtain:

$$\begin{aligned} \text{Stage} &= 0.194 + 0.133 \text{ } ^\circ\text{DA} - 0.000433 \text{ } ^\circ\text{DA}^2 \\ &\quad + 0.00000057 \text{ } ^\circ\text{DA}^3 \\ &= 0.194 + 0.133 (83.3) - 0.000433 (83.3)^2 \\ &\quad + 0.00000057 (83.3)^3 = 8.6 \end{aligned}$$

this indicates that the fall armyworm is found in the egg hatch stage. Thus, 10 d after planting, the crop would be unharmed.

Table 4 presents the °DA, the above estimates and forecasts for 16 and 18 d after the planting date. The larvae will be in 3rd and 4th instar, while the crop is in 2nd and 3rd leaf; so a preventive action must be recommended to reduce damage.

CONCLUSIONS

The average minimum threshold temperature development was 8.7 °C and the average maximum threshold temperature of development was 39.8 °C. The thermal requirement for the biological cycle of fall armyworm was 504 °DA, whereas the thermal requirement of maize cultivation-physiological maturity was 1454 °DA. The third degree polynomial regression models for the fall armyworm and maize crop were suitable for estimating the phenological

- BBCH (Centro Federal de Investigaciones Biológicas para Agricultura y Silvicultura). 2001. Estadios de las Plantas Mono y Dicotiledóneas. Monografía. 149 p.
- Capinera, J. L. 2001. Handbook of Vegetable Pests. Academic Press, San Diego. 729 p.
- Damos, P., and M. Savopoulou-Soultani. 2012. Temperature-driven models for insect development and vital thermal requirements: *Psyche* 2012. doi:10.1155/2012/123405.
- USDA/Foreign Agricultural Service. 2010. Grain: World Markets and Trade. Circular Series FG 05-10. 60 p.
- Gillespie, T. J., and P. C. Sentelhas. 2008. Agrometeorology and plant disease management - A happy marriage. *Scientia Agricola* 65: 71-75.
- Hogg, D., and A. Gutierrez. 1980. A model of the flight phenology of the beet armyworm, *Spodoptera exigua* (Lepidoptera: Noctuidae), in central California. *Hilgardia* 48: 1-36.
- Lancashire, P., H. Bleiholder, P. Langelluddecke, R. Stauss, T. Van Den Boom, E. Weber, and A. Witzemberger. 1991. A uniform decimal code for growth stages of crops and weeds. *Ann. Appl. Biol.* 119: 561-601.
- Meza P, R., y J. R. Angulo S., 2008. Producción de maíz blanco en la zona centro de Sinaloa. Documento Técnico para Productores. Fundación Produce Sinaloa, A.C. 35 p.
- Montgomery D. C., E. A. Peck, and G. G. Vining, 2004. Introducción al Análisis de Regresión Lineal. Editorial CECOSA, México, D. F. 588 p.
- Oerke, E. C. 2006. Crop losses to pest. *J. Agric. Sci.* 144: 31-43.
- Ojeda-Bustamante, W., E. Sifuentes-Ibarra, y H. Unland-Wess. 2006. Programación integral del riego en maíz en el norte de Sinaloa, México. *Agrociencia* 40: 13-25.
- Poisot, A. S., A. Speedy, and E. Kueneman. 2004. Good Agricultural Practices -a Working Concept, FAO: GAP Working Paper Series 5.
- Ritchie, S., and J. Hanway. 1984. How a corn plant develops. Special Report Number 48. Iowa State University of Science and Technology, Ames, Iowa. 21 p.
- stages in terms of the thermal requirement. The models estimated for the crop and pest can be used concurrently to predict the risk points for cultivation according to the phenological development and thermal requirements.
- End of the English version—
- *-----
- Ruiz-Corral, J., H. Flores-López, J. Ramírez-Díaz, y D. González-Eguiarte. 2002. Temperaturas cardinales y duración del ciclo de madurez del híbrido de maíz H-311 en condiciones de temporal. *Jalisco, México. Agrociencia* 36: 569-577.
- Santos, L., R. Redaelli, G. Diefenbach, and C. Efrom. 2003. Larval and pupal stages of *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae) and sweet and field corn genotypes. *Braz. J. Biol.* 63:627-633.
- SIAP. 2009. Servicio de información agroalimentaria y pesquera. <http://www.siap.gob.mx/index> (Consultado: julio de 2010).
- Simmons, A. 1993. Effects of constant and fluctuating temperatures and humidities on the survival of *Spodoptera frugiperda* pupae (Lepidoptera: Noctuidae). *Fla. Entomol. Soc.* 76(2), pp: 333-340.
- Weber, E., and H. Bleiholder. 1990. Erläuterungen zu den BBCH-Dezimal-Codes für die Entwicklungsstadien von Mais, Raps, Faba-Bohne, Sonnenblume und Erbse - mit Abbildungen. *Gesunde Pflanzen* 42: 308-321.
- Zalom, F., P. Goodell, L. Wilson, W. Barnett, and W. Bentley. 1983. Degree-days: the calculation and use of heat unit in pest management. Division of Agricultural and Natural Resources, University of California, Davis, CA, USA. 10 p.