



MODELADO DEL TIEMPO FISIOLÓGICO DE *Ceratitis capitata* MEDIANTE SENSORES REMOTOS EN TERRITORIOS ESTRATÉGICOS DE CENTROAMÉRICA

Enrique Ibarra Zapata¹
Carlos Arturo Aguirre Salado¹
Gustavo Mora Aguilera²
Catarina Loredo Osti¹
Liliana Miranda Aragón¹
Martín Escoto Rodríguez¹
Juan José Silva Gallegos¹

(Manuscrito recibido el 16 de diciembre de 2022, en versión final 1 de marzo de 2023)

Para citar este documento

Ibarra Zapata, E., Aguirre Salado, C.A., Mora Aguilera G., Loredo Osti C., Miranda Aragón, L., Escoto Rodríguez, M. & Silva Gallegos, J.J. (2023). Modelado del tiempo fisiológico de *Ceratitis capitata* mediante sensores remotos en territorios estratégicos de Centroamérica. *Boletín geográfico*, 45, <http://id.caicyt.gov.ar/ark:/s2313903x//3frjzffgh>

Resumen

La mosca del Mediterráneo es una plaga cuarentenaria que puede afectar de manera directa la producción y comercialización de frutas y hortalizas en el mundo, es una especie con un comportamiento polífago y cuenta con un gran número de hospedantes susceptibles tanto silvestres como de importancia económica.

Actualmente, en Centroamérica y Sur de México existen territorios estratégicos en los que se mantiene un monitoreo permanente de la plaga los cuales se consideran

¹ Facultad de Agronomía y Veterinaria, Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Carretera San Luis - Matehuala Km. 14.5 Ejido Palma de la Cruz, 78321 Soledad de Graciano Sánchez, S.L.P. E-mail: enrique.zapata@uaslp.mx, carlos.aguirre@uaslp.mx, martin.escoto@uaslp.mx, catarina.loredo@uaslp.mx, liliana.miranda@uaslp.mx, juan.silva@uaslp.mx

² Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco Km. 36.5, Montecillo, Texcoco 56230, Estado de México. E-mail morag@colpos.mx

una barrera en su avance hacia el norte del continente. La utilización de sensores remotos en el área de la fitosanidad tiene el potencial de aportar a la toma de decisiones en el establecimiento de estrategias preventivas de mitigación de avance y riesgo fitosanitario de *Ceratitis capitata*, incluso, se puede considerar una herramienta geotecnológica que permite coadyuvar en los procesos de monitoreo y vigilancia de riesgos sanitarios, a través del análisis de información ambiental, en este caso, del componente térmico, puesto que la temperatura es un factor esencial para los estados inmaduros y adultos de la mosca del Mediterráneo.

El objetivo del presente estudio fue diseñar el tiempo fisiológico de *C. capitata* a través del cálculo de las unidades calor acumuladas (UCAcum) en territorios estratégicos (zona de contención potencial, de contención y de erradicación), mediante el uso de imágenes satelitales climáticas ERA5. Se obtuvo un patrón espacio-temporal del periodo comprendido entre diciembre de 2020 a diciembre de 2021 del comportamiento térmico mensual que favorece a *C. capitata* en dos escalas: regional que abarcó los países de El Salvador, Honduras, Guatemala y sur de México, así como en las zonas estratégicas antes definidas. Se evidenció que durante 2021 existió una oscilación térmica mensual de 13,1 a 37,4°C, consideradas las temperaturas extremas. De manera específica, se identificaron las superficies donde existió la acumulación térmica óptima que determina el tiempo fisiológico de la plaga, basados en que *C. capitata* requiere de 251,7 UCAcum para lograr un ciclo de vida. Se determinó que en la zona de contención potencial se acumularon 463,4 unidades en porciones de Honduras y El Salvador.

En la zona de contención ubicada en Guatemala se determinó 418,8 UCAcum y finalmente en la zona de erradicación se logró una acumulación de 401,3 unidades en Guatemala y costa del Pacífico en el sureste mexicano, lo que permitió espacializar que el tiempo fisiológico presentó un comportamiento uniforme en los territorios estratégicos. Diseñar o modelar UCAcum a partir de sensores remotos posibilita fortalecer decisiones estratégicas ante riesgos sanitarios, y tiene como fortaleza que son insumos de libre acceso y de una temporalidad reciente, lo que permite crear escenarios de riesgo bajo un enfoque preventivo en tiempo casi real (con un retraso de unas semanas).

La modelación del confort térmico debería ser considerada un insumo coadyuvante para direccionar de manera efectiva estrategias preventivas por parte de los Organismos Nacionales y Regionales de Protección Fitosanitaria que se encargan de recomendar acciones ante el arribo de plagas o enfermedades que ponen en riesgo el patrimonio agroalimentario mundial

Palabras clave: Mosca del Mediterráneo, Unidades calor acumuladas, Riesgo fitosanitario, Monitoreo, Vigilancia Epidemiológica.

MODELING THE PHYSIOLOGICAL TIMING OF *Ceratitis capitata* THROUGH REMOTE SENSING IN STRATEGIC TERRITORIES IN CENTRAL AMERICA

Abstract

The Mediterranean fly is a quarantine pest that can directly affect the production and marketing of fruits and vegetables worldwide. It is a species with polyphagous behavior and has a high number of susceptible hosts, both wild and economically important. Currently, in Central America and Southern Mexico there are strategic territories with permanent monitoring of the pest, which act as barriers in its advance towards North America. The use of remote sensors in the phytosanitary area has the potential to contribute to decision-making in the establishment of preventive strategies to mitigate the advance and phytosanitary risk of *Ceratitis capitata*. It can even be considered a geotechnological tool that allows contributing to the processes of monitoring and surveillance of health risks, through the analysis of environmental information, particularly the thermal component. Temperature is an essential factor for the immature and adult stages of the Medfly. The objective of this study was to design the physiological time of *C. capitata* through the calculation of accumulated heat units (UCAcum) in strategic territories. Specifically, the study aimed to model and calculate the physiological time of *C. capitata* through the accumulated heat units (UCAcum) in the potential containment, containment, and eradication zones using ERA5 data.

A spatio-temporal pattern was obtained for the period from December 2020 to December 2021, showing the monthly thermal behavior that favors *C. capitata* on two scales: a regional scale that included the countries of El Salvador, Honduras, Guatemala, and southern Mexico, and the previously defined strategic zones.

The study revealed a monthly thermal oscillation from 13,1 to 37,4°C, considering extreme temperatures. The surfaces with optimal thermal accumulation, determining the physiological time of the pest, were identified based on the fact that *C. capitata* requires 251,7 UCAcum to complete a life cycle. In the potential containment zone, 463,4 UCAcum were determined for portions of Honduras and El Salvador. In the containment zone in Guatemala, 418,8 UCAcum were identified, and finally, in the eradication zone, an accumulation of 401.3 units was observed in Guatemala and the Pacific coast in the Mexican southeast. This spatial analysis showed that the physiological time presented a uniform behavior in strategic territories.

Modeling UCAcum from remote sensing strengthens strategic decision-making regarding health risks. The strength of this approach lies in the accessibility of freely available inputs and recent temporality, allowing the creation of risk scenarios under a preventive approach in almost real time (with a three-week delay). Thermal comfort modeling should be considered a contributing input to effectively direct preventive

strategies by the National and Regional Plant Protection Organizations. These organizations are responsible for implementing mitigation strategies before the arrival of pests or diseases that endanger the global agroalimentary heritage..

Keywords: Mediterranean fruit fly, Cumulative thermal units, Phytosanitary risk, Monitoring, Epidemiological surveillance

Introducción

La mosca del Mediterráneo, *Ceratitis capitata* (Wiedemann, 1824), es una de las plagas de los frutales y hortalizas más importante del mundo, puede ocasionar daños a especies cultivables y silvestres por lo que se considera una amenaza fitosanitaria latente al causar afectaciones directas en la reducción de rendimientos y pérdida de calidad de gran número de productos agroalimentarios (SENASICA, 2020). De acuerdo con Enkerlin *et al.*, (2015), el primer registro de *C. capitata* en América se remonta al periodo entre 1901 y 1905. En Centroamérica se reportó por primera vez en 1955 en Costa Rica, de donde se extendió por toda la región hasta llegar a Guatemala en 1976, y posteriormente, al año siguiente a Chiapas en la República Mexicana. Para 1979 había invadido una sección de 300 km por la línea de Costa del Pacífico desde la frontera entre Guatemala-México hasta el estado de Oaxaca (Gutiérrez-Samperio, 1979 y Schwarz, Liedo & Hendrichs, 1989).

El ciclo de vida de *C. capitata* está altamente influenciado por la temperatura (PHYTOMA, 2016), al igual que por otros factores abióticos como la precipitación y la humedad relativa (Harris & Lee, 1987). Sin embargo, el factor térmico aporta un efecto determinante en la dinámica poblacional y en los niveles de infestación, además que un factor esencial para los estados inmaduros y adultos de la plaga (Segura, Vera, & Cladera, 2006), por ello, la importancia de monitorear el tiempo fisiológico a través de las unidades calor acumuladas (UCAcum) en las porciones territoriales estratégicas para el monitoreo y vigilancia de la mosca del Mediterráneo.

Los territorios estratégicos se denominan: zona de contención potencial, zona de contención y zona de erradicación, los cuales se ubican en Centroamérica y en la porción sur de México (Figura 1). De acuerdo con Enkerlin *et al.*, (2017), se consideran una barrera efectiva para mantener un estatus fitosanitario libre de *C. capitata* en la región, incluso, esta regionalización ha sido determinante para contener el avance de la mosca del Mediterráneo hacia nuevos territorios, ya que, además de que poseen una ubicación estratégica, fungen como una zona tapón, lo que en buena medida ha permitido disminuir el área de dispersión e invasión de la plaga, por ello, se pueden considerar porciones territoriales determinantes y prioritarios para el monitoreo y vigilancia epidemiológica de la plaga en un contexto regional.

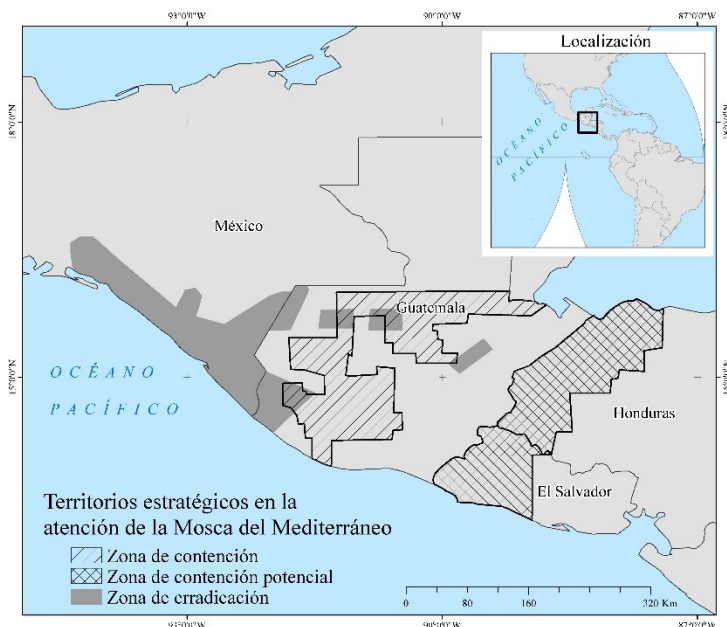


Figura 1. Zonas de atención estratégica de la Mosca del Mediterráneo en Centro y Norteamérica. Fuente: Elaboración propia, tomado de Enkerlin *et al.*, (2017).

De acuerdo con Vargas (1993), las UCAcum se pueden concebir como un instrumento de monitoreo y evaluación del comportamiento de plagas agrícolas. Al respecto, Grageda-Grageda, Ruiz-Corral, Jiménez-Lagunes, y Fu-Castillo (2014) modelaron las condiciones favorables para el gusano barrenador de la nuez, la roya de la hoja y la roya lineal basados en el factor térmico en la porción Noroeste de México. Lograron evidenciar un incremento en el número de generaciones de las plagas, lo que implícitamente conlleva a elevar los costos para su control y una disminución en la producción de agroalimentos, sus resultados plasmados en mapas de generación por factor térmico se consideran un modelo de pronóstico favorable en la fitosanidad.

Tepole-García, Ramírez-Rojas, Bartolo-Reyes, y Castrejón-Gómez (2016), calcularon el número de generaciones que presenta la chinche patas de hoja (*Leptoglossus zonatus*) en un ciclo agrícola para estimar el daño potencial en las áreas productoras de sorgo en el estado de Morelos en México. Utilizaron datos de temperatura a partir de estaciones climatológicas para calcular el número de generaciones a través de las UCAcum y con ello estimar el daño potencial a través de un modelo pronóstico de riesgo basado en los requerimientos calóricos de la plaga en las áreas productoras de sorgo. Entre sus conclusiones señalan que este tipo de modelos permite detectar la etapa más susceptible al daño de la plaga, lo que sustenta tomar una decisión bajo un enfoque preventivo y con ello establecer acciones de

vigilancia, para realizar una detección oportuna o incluso eliminar posibles focos de infestación.

Por su parte, Pacheco-Covarrubias, Soto-Nolasco, y Valenzuela-Valenzuela (2016) realizaron el cálculo del número de generaciones de mosca blanca (*Bemisia tabaci*) a través de las UCAcum, lograron evidenciar que los factores que inciden en el crecimiento poblacional de *B. tabaci* son la temperatura al acortar su ciclo de vida y así dar oportunidad para incrementar el número de generaciones y alimento. Esto porque, el cálculo de la acumulación térmica resultó un método que permitió coadyuvar en la toma de decisiones para mantener un estatus fitosanitario ausente de plagas de importancia económica. La determinación de las UCAcum permitió comprender el comportamiento epidémico de una plaga con el potencial de ocasionar grandes daños a cultivos agroalimentarios, asociados a su capacidad polífaga, además que puede transmitir enfermedades y ocasionar daños irreversibles a los cultivos de importancia económica (Pacheco-Covarrubias *et al.*, 2016).

Recientemente Olvera Vargas, Contreras Medina, y Aguilar Rivera, (2020) utilizaron imágenes satelitales MODIS para calcular los grados días de desarrollo de *Hypothenemus hampei* en la región cafetalera de México. Lograron espacializar el riesgo fitosanitario del problema entomológico más importante del cultivo del café, destacan, que esta metodología permite apoyar los procesos de monitoreo y vigilancia de plagas de importancia cuarentenaria o económica. Incluso, señalan que este tipo enfoques permite crear y aplicar metodologías que involucren la variable tiempo, lo que posibilita dar soporte a los procesos de vigilancia epidemiológica de la plaga. Derivado de su investigación concluyeron que el uso de imágenes satelitales se debe considerar un insumo importante para fortalecer las estrategias de monitoreo de plagas de importancia económica.

En escala global la temperatura ambiental resulta un elemento esencial en el ciclo biológico de los insectos, sin embargo, su incremento puede generar condiciones propicias para diferentes problemas fitosanitarios devastadores como *C. capitata*, asociados de manera particular a su capacidad polífaga y su amplio rango de hospedantes. Según el Laboratorio Nacional de Modelaje y Sensores Remotos (LNMySR-INIFAP, 2022) las UCAcum se pueden definir como una expresión matemática de la acumulación de temperatura crítica de un organismo, que es equivalente al desarrollo de la especie. De acuerdo con Grageda-Grageda, Ruiz-Corral, Jiménez-Lagunes, y Fu-Castillo (2014) el factor térmico es determinante en la aparición de brotes de problemas fitosanitarios. Por ello, la estimación de modelos como las UCAcum a partir de productos derivados de imágenes satelitales, proporciona insumos estratégicos en la mitigación del riesgo, que según, Tepole-García *et al.*, (2016) la estimación de modelos a partir de productos derivados de imágenes satelitales se puede considerar como una herramienta preventiva/reactiva.

Derivado de lo anterior, el objetivo de la presente investigación fue diseñar el tiempo fisiológico de *C. capitata* a través del cálculo de las UCAcum mediante la utilización de datos ERA5 en territorios estratégicos en las denominadas zonas de

erradicación, contención y contención potencial, los cuales se ubican próximos a los límites de Centro y Norteamérica. Ya que, el factor térmico está estrechamente ligado al ciclo biológico de muchos organismos, y de manera específica favorece la presencia de brotes *C. capitata*, según Ramírez-Cabral, Medina-García y Kumar (2020), a partir de la temperatura promedio mensual, máxima y mínima, se puede inferir la cantidad de calor para el desarrollo del ciclo de vida, a través de la medición de la acumulación de calor a lo largo de un tiempo (Ramírez-Cabral *et al.* 2020).

Metodología

De acuerdo con Duyck y Quilici (2002), *C. capitata* requiere una temperatura base (T_b) de $10,45^{\circ}\text{C}$, que se entiende como la temperatura mínima por debajo de la cual su desarrollo no ocurre, en complemento sus requerimientos calóricos específicos para completar un ciclo de vida, se puede alcanzar mediante un acumulado de 251,7 grados para lograr una generación, equivalente a un ciclo de vida. Según METEORED (2020), esta acumulación térmica en el año se denomina tiempo fisiológico de la especie y puede estimarse mediante el cálculo de las UCAcum que se ajusta a las funciones seno de la temperatura máxima y mínima (Ramírez-Cabral *et al.* 2020), conforme a la ecuación (1):

$$\text{UCAcum} = \Sigma((T_{\text{max}} + T_{\text{min}})/2) - T_b \quad (1)$$

Donde UCAcum son las unidades calor acumuladas ($^{\circ}\text{C}$), T_{max} es la temperatura máxima ($^{\circ}\text{C}$), T_{min} es la temperatura mínima ($^{\circ}\text{C}$) y T_b es la temperatura base ($^{\circ}\text{C}$)

La estimación de las UCAcum mensual involucró el uso de datos climáticos ERA5. De acuerdo con ASGROW (2018), el uso de tecnología geoespacial puede fortalecer los sistemas de monitoreo de plagas y enfermedades agrícolas. En este sentido, la aplicación de sensores remotos permite fortalecer la toma de decisiones en materia de la sanidad de las plantas, ya que permiten la adquisición de información de variables climáticas atmosféricas, terrestres u oceánicas, que en determinado momento benefician o producen la merma de la reproducción de un organismo polífago y altamente peligroso para la producción de agroalimentos como *C. capitata*.

Los insumos satelitales se obtuvieron del Servicio de Cambio Climático Copernicus (Copernicus Climate Change Service, C3S) del European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), que proporciona datos climatológicos de toda la superficie terrestre. Las coberturas específicas de temperatura mensual (máximas y mínimas) corresponden al subproducto satelital de reanálisis ERA5, que proporcionan información actual sobre clima, con una resolución espacial de 24 km ($0,25$ grados x $0,25$ grados), que estima los parámetros climáticos de la combinación de datos satelitales meteorológicos con datos de estaciones terrestres (CCCS-C3S, 2017). El cálculo de las UCAcum se realizó a partir del análisis mensual de 26

imágenes satelitales (formato .tiff), de un periodo de cuatro estaciones de invierno a invierno entre los años 2020 y 2021, descargadas del sitio <https://app.climateengine.com/climateEngine>.

En complemento para el cálculo de las UCAcum se creó una cobertura espacial de la Tb, que abarcó la región de estudio definiendo una resolución espacial conforme la imagen ERA5, involucró un proceso de transformación y reclasificación de formato (raster-vector-raster), para lo cual, se asignó un valor de pixel de 10,45°C, al considerarse la temperatura a la cual *C. capitata* detiene su desarrollo, y a partir de la cual según se acumule puede acelerar o disminuir su desarrollo en función del comportamiento térmico conforme lo señalado por Duyck y Quilici (2002).

El procedimiento para obtener la estimación del tiempo fisiológico de *C. capitata* se realizó a través de la herramienta “Raster calculator” mediante algebra de mapas, siendo un proceso reiterativo para cada mes (13 en total). El cálculo se realizó bajo el comando: ((UC="Tmax_fecha1.tif" + "Tmin_fecha1") / 2 - "Tb.tif"). La definición espacial de las UCAcum se realizó a través de un proceso de enmascaramiento con las tres zonas estratégicas para el monitoreo de *C. capitata* identificadas por Enkerlin *et al.*, (2017): contención potencial, contención y erradicación, ubicadas en la porción norte de Centroamérica y el sur de México.

En consecuencia, se realizó un proceso de estandarización para la representación espacial del comportamiento térmico que favorece a *C. capitata*. Ese proceso, involucró los valores extremos ocurridos dentro de las tres zonas analizadas, lo que permitió determinar una temperatura mínima de 12,3°C ocurrida en la zona de contención durante diciembre de 2021 y una temperatura máxima de 37,4°C registrada en la zona de erradicación durante abril del mismo año. El comportamiento térmico se representó cartográficamente en trece rangos para el periodo de estudio, espacialmente representado en tonalidades frías a cálidas (de azul a rojo).

Espacialmente la estimación del tiempo fisiológico a partir de imágenes satelitales se realizó a través del operador booleano de intersección AND mediante la herramienta “Raster Calculator”, bajo la expresión (UCAcum="1.tif" + "2.tif" + "3.tif" + "4.tif" + "5.tif" + "6.tif" + "7.tif" + "8.tif" + "9.tif" + "10.tif" + "11.tif" + "12.tif" + "13.tif"). Cada cobertura fue equivalente a un mes en el periodo de estudio, lo que permitió obtener las UCAcum de *C. capitata*, es decir, este procedimiento permitió evidenciar la acumulación de calor que posibilita cuantificar el ¿Cuánto?, ¿Cuándo? y el ¿Dónde? se pueden lograr “n” número de generaciones en escala: regional y en las zonas estratégicas de contención potencial, contención y erradicación.

Resultados y Discusión

El tiempo fisiológico de *C. capitata* se representó cartográficamente en cinco rangos por medio de los cuales se evidenció territorialmente donde existieron las

condiciones para lograr alcanzar una generación o ciclo de vida de la plaga (tonalidades azules). Así mismo, se evidenciaron porciones territoriales en donde existieron las condiciones térmicas que posibilitan lograr una generación más (dos generaciones), representado en tonalidades de naranja a rojo, conforme las UCAcum mensuales. Estos resultados se obtuvieron al considerar los requerimientos calóricos para la mosca del Mediterráneo conforme lo señalado por Duyck & Quilici (2002).

De manera regional existió un comportamiento térmico mensual promedio que osciló entre los 13,1°C y los 37,4°C entre el periodo de diciembre a diciembre de 2020/2021. Es decir, reflejó un comportamiento mensual de valores térmicos superiores a su T_b (10,45°C), lo que representó que es una región en la que ambientalmente existen (por acumulación térmica) las condiciones que pueden favorecer el ciclo de vida de la mosca del Mediterráneo.

Es pertinente señalar, que en el periodo de estudio existió un aumento térmico de febrero a octubre, sin embargo, en los meses de abril y mayo fue cuando se registró una superficie de mayor extensión con las temperaturas más elevadas (32,9 y 38,8°C respectivamente), representadas en tonalidades de naranja a rojo. Las porciones con mayor extensión territorial y con más elevada temperatura se ubicaron en la Península de Yucatán e Istmo de Tehuantepec en México, así como el norte de Guatemala, seguida de una porción en la costa del Pacífico en Centroamérica, específicamente en El Salvador y Nicaragua, en complemento, se evidenció pequeñas porciones con tendencia de condiciones térmicas elevadas al norte/noreste de Nicaragua. El comportamiento espacio-temporal del factor térmico mensual permitió evidenciar de manera cartográfica variaciones territoriales en las que converge distribución espacial, distribución temporal y condiciones de confort para *C. capitata* como se aprecia en la Figura 2.

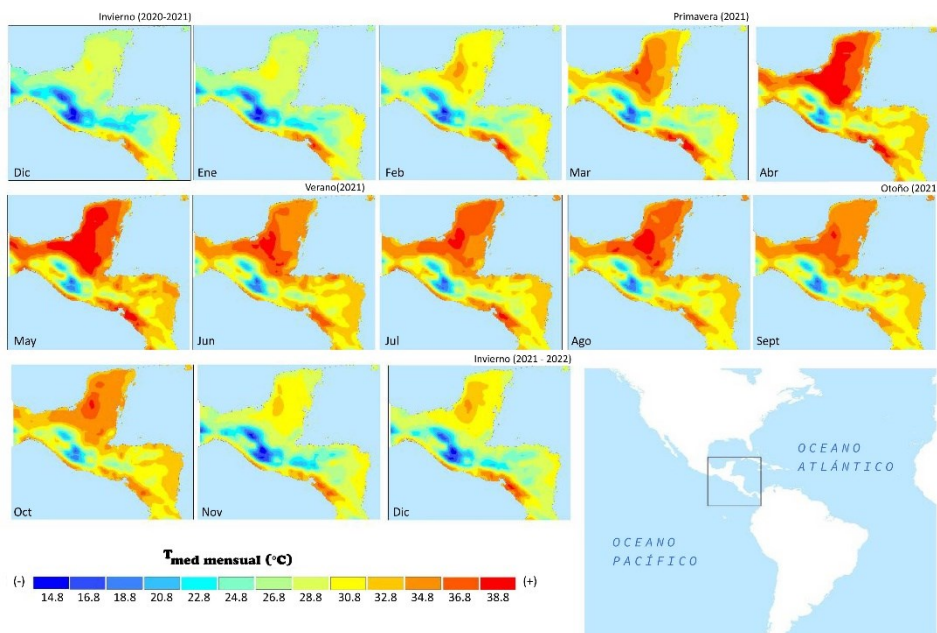


Figura 2. Evolución espacio-temporal de la temperatura media mensual (T_{med} mensual, $^{\circ}\text{C}$) (factor térmico óptimo) para *C. capitata* en escala regional. Fuente: Elaboración propia, a partir de imágenes satelitales ERA5 del Centro Europeo de Pronósticos Meteorológicos a Medio Plazo (ECMWF).

Por el contrario, espacialmente existió un patrón de distribución espacial donde se presentaron las temperaturas promedio mensuales más bajas (en tonalidad azul). Cabe señalar, que espacialmente el comportamiento térmico de temperaturas bajas fue oscilante en todos los meses entre otoño/invierno, ya sea al disminuir o aumentar en extensión territorial durante los meses comprendidos en este periodo. El rango térmico mínimo osciló entre los $13,2$ y $18,9^{\circ}\text{C}$, destacando que la mayor extensión territorial con las condiciones térmicas más bajas se identificó en una franja entre la parte central de Guatemala y Chiapas en México extendiéndose hacia el noroeste, así como una porción más estrecha al sur de Honduras y colindante a la señalada anteriormente (Figura 2).

Espacialmente, el tiempo fisiológico presentó un comportamiento uniforme en los territorios estratégicos. En la zona de erradicación existieron condiciones térmicas para lograr una generación, en complemento, en toda la Costa del Pacífico existieron condiciones térmicas para favorecer hasta dos generaciones de la plaga, solo con un déficit de $84,6$ UCAcum, esta condición presentó la mayor concentración térmica en la porción ubicada al límite entre México y Guatemala. Cabe señalar que, durante el periodo de estudio la temperatura mensual promedio mínima y máxima fue de $13,1^{\circ}\text{C}$

en noviembre y 37,4° en abril. Temporalmente, la zona de erradicación logró una acumulación de 418,8 UCAcum, además, es pertinente señalar que para los meses junio/julio ya existían condiciones térmicas para lograr una generación o ciclo de vida de *C. capitata*, lo cual se logró evidenciar al cuantificar una acumulación que osciló entre las 225,6 y 258,6 UCAcum para este periodo, de acuerdo con los requerimientos calóricos para la especie señalados por Duyck & Quilici (2002) (Figura 3a).

En la zona de contención se presentó un patrón térmico homogéneo en la porción central de Guatemala donde se presentaron las condiciones para alcanzar una generación, además en la porción norte de esta misma zona existió una acumulación de temperatura para generar una posible segunda generación durante el periodo de estudio. Cabe señalar que la temperatura mínima mensual se registró en noviembre con 19,3°C y la máxima mensual fue de 36,3°C durante mayo. En esta zona a nivel regional se evidencio la menor acumulación térmica con 401,3 UCAcum, y temporalmente fue la que presento mayor retraso en la acumulación, ocurrida para julio/agosto, debido a que ya existían las condiciones para lograr una generación con un rango térmico que osciló entre las 249,6 a 281,9 UCAcum (Figura 3b).

En la zona de contención potencial se presentó la mayor acumulación térmica en la porción territorial limítrofe entre el Salvador y norte de Honduras, donde se logró delimitar algunas porciones territoriales donde se acumuló entre 308,0 y 424,0 UCAcum, representado en tonalidades naranja y rojo respectivamente. La zona de contención potencial presentó una variación térmica determinada con una temperatura mínima de 12,3°C durante diciembre de 2020 y una temperatura máxima mensual promedio de 37,1°C en mayo. En la zona de contención potencial se logró alcanzar la mayor acumulación térmica regional, estimada en las 463,4 UCAcum. Cabe señalar que para el periodo entre junio/julio ya existía las condiciones para que *C. capitata* pudiera lograr una generación con un comportamiento térmico estimado entre las 249,8 y 287,2 UCAcum, siendo las condiciones óptimas para que la plaga pudiera lograr una generación o un ciclo de vida (Figura 3c), conforme los parámetros térmicos determinados por Duyck & Quilici (2002).

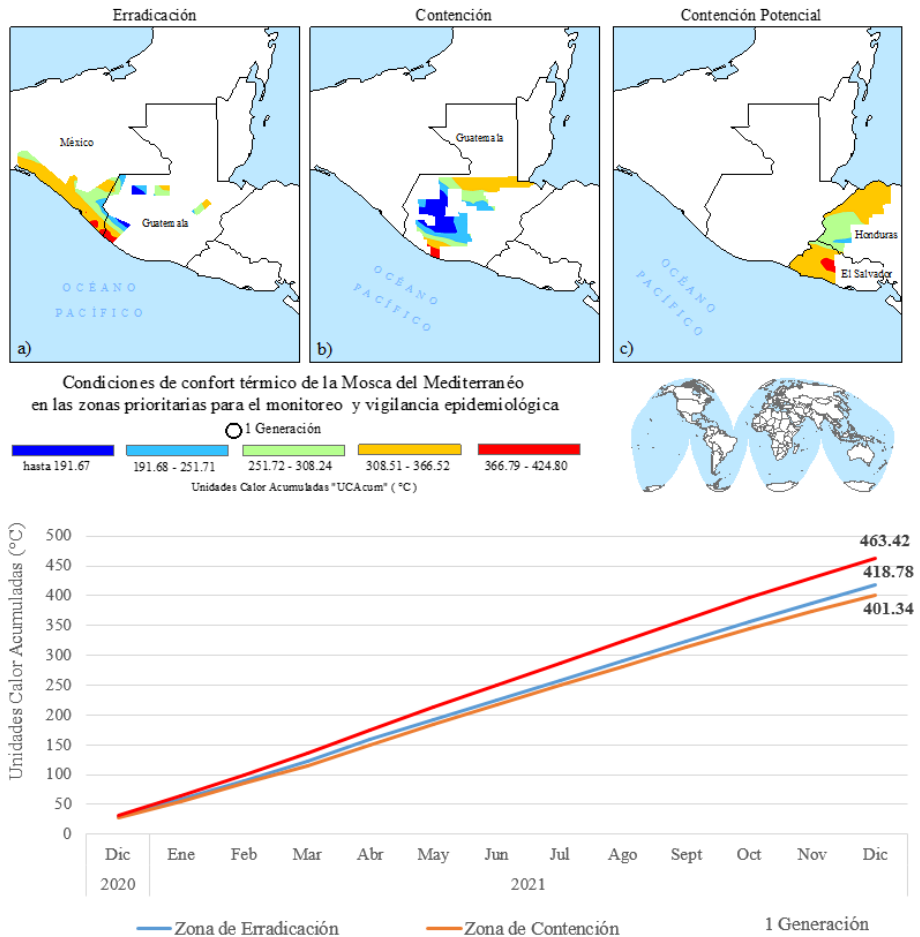


Figura 3. Comportamiento espacio-temporal de las Unidades Calor Acumuladas en los territorios estratégicos para la Mosca del Mediterráneo: a) Zona de erradicación, b) Zona de contención y c) Zona de contención potencial.

El modelado geoespacial de las UCAcum de *C. capitata* a partir del sensor remoto (ERA5), logró evidenciar que para los meses de junio/julio del año 2021 ya existían las condiciones térmicas para lograr una generación en las zonas de erradicación y de contención potencial con 258,6 y 287,2 UCAcum respectivamente, lo cual ocurrió a la mitad del periodo de estudio. Sin embargo, en la zona de contención existió un patrón espacio-temporal diferente, al presentar condiciones de confort térmico óptimos para el periodo entre julio/agosto con una acumulación térmica de 281,9 UCAcum, es decir, de manera temporal se presentaron las

condiciones de confort térmico en esta zona (contención) con un mes de desfase respecto a los otros dos territorios estratégicos para atención de la mosca del Mediterráneo. En la zona de contención se logró definir una porción prioritaria territorialmente de norte a sur, la cual se extendió por una franja de Costa en la planicie de la costa del Pacífico desde Chiapas, México y hasta Guatemala, lo que permitió definir la primera región con condiciones para lograr una generación, seguida de otra porción en la parte central de Guatemala y finalmente una más entre los límites el norte de Honduras y el Salvador.

A partir de los resultados obtenidos podemos inferir que en las tres zonas de atención estratégica en Centro y Norteamérica señaladas por Enkerlin *et al.* (2017), fue factible alcanzar una generación de la plaga. Sin embargo, es pertinente resaltar que en la zona de contención potencial existió un déficit de 39,9 UCAcum para lograr una segunda generación de la plaga, es decir, la porción estratégica más al sur del continente, cuenta con la mayor aptitud térmica para un incremento poblacional de la especie y territorialmente se definen dos porciones que pueden coadyuvar en direccionar acciones de vigilancia activa y pasiva de la mosca del Mediterráneo. La primera de mayor prioridad fue ubicada hacia la costa del Pacífico (tonalidad roja en la Figura 3c), y la segunda hacia la Costa del Caribe en virtud de los límites de la zona de contención potencial, la cual se representó en tono naranja en la Figura 3c.

En orden de importancia como segunda porción prioritaria se localizó la zona de erradicación en la que faltaron 84,6 UCAcum para lograr una posible segunda generación de *C. capitata*. En esta zona el territorio prioritario se ubicó en la zona limítrofe de Guatemala y México en la costa de Pacífico, además se identificó una franja con el potencial de incrementar la temperatura y con ello una posible aparición de focos de la plaga, al incidir la triada plaga/ambiente/hospedero, lo cual se refleja en la Figura 3a. Finalmente, la zona de contención fue la que contó con menor aptitud térmica faltando 102,1 UCAcum para una posible segunda generación de *C. capitata*. Según nuestros resultados, para este periodo y en escala regional la zona de contención potencial debió ser la prioritaria, sin embargo, nuestro enfoque permite identificar los puntos de calor donde existió la mayor acumulación y por ende las porciones territoriales prioritarias en cada una de las zonas estratégicas lo cual se puede observar en la Figura 3 en tonalidades rojas.

El componente fundamental de esta investigación involucró un abordaje teórico/metodológico de carácter transdisciplinario y al utilizar insumos de carácter satelital de variables térmicas puede aportar a la toma de decisiones fitosanitarias al permitir realizar cálculos de tiempo fisiológico actual de especies consideradas devastadoras como *C. capitata*. Sin embargo, es pertinente señalar que las imágenes ERA5 cuentan con una baja resolución espacial pero una alta resolución temporal, es decir, un tamaño de pixel de 24 km y un periodo de tiempo de adquisición de imagen con dos o tres semanas de desfase a fecha actual, lo que posibilita analizar imágenes satelitales actuales, pero sin distinguir estructuras de tamaño pequeño en el territorio. Como fortaleza de los resultados obtenidos es que puede ser un insumo para detonar

estrategias de mitigación del riesgo de plagas en escala regional y puede complementarse con otros sensores como CFS Reanalysis (19 km) con la misma resolución temporal.

Finalmente, la estimación de UCAcum se puede considerar un insumo importante en la evaluación espacial multicriterio, ya que permite la integración de “n” cantidad de variables y con ello obtener un modelo cartográfico de riesgo fitosanitario robusto desde una perspectiva preventiva lo que posibilita robustecer el denominado Análisis de Riesgo de Plagas, que determinan el riesgo de ocurrencia de plagas en un ámbito global y es respaldado como un instrumento de evaluación oficial en el mundo por la Convención Internacional de Protección Fitosanitaria CIPF (FAO-ONU, 2022).

Conclusiones

Estimar el tiempo fisiológico (UCAcum) mediante el uso de imágenes de satélite para especies consideradas altamente peligrosas como *C. capitata* resulta una estrategia preventiva, considerada a la vez novedosa y robusta, ya que permite fortalecer la toma de decisiones en sanidad vegetal. La incorporación de insumos de carácter satelital potencializa analizar una gran cantidad de datos (en este caso térmicos), lo que proporciona información tangible y en tiempo casi real (con una o dos semanas de desfase) de los requerimientos calóricos para que una especie logre alcanzar un ciclo de vida. Y recordemos que conocer el ciclo de vida de una especie es esencial para lograr un manejo adecuado, puesto que permite determinar los periodos o estadios óptimos para implementar estrategias para controlar las poblaciones de dicha especie, lo que indirectamente puede traducirse en una optimización de recursos económicos, de personal y de material necesario para un manejo adecuado. La metodología expuesta en esta investigación proporciona los elementos técnico-científicos necesarios para dar robustez a las decisiones estratégicas en materia fitosanitaria basado en un enfoque geo tecnológico, aportando en la colocación o redireccionamiento de las acciones operativas de vigilancia epidemiológica (rutas de trampeo, rutas de vigilancia, áreas de exploración, parcelas centinelas, entre otras), este tipo de modelado, otorga certeza y robustez a los sistemas de alerta temprana y mitigación del riesgo fitosanitario, bajo un enfoque preventivo y dinámico.

Referencias

- ASGROW. (2018) Manejo de Zonas de Plagas con Imágenes Satelitales. <https://www.asgrow.com.mx/es-mx/tendencias/agrotecnologia/manejo-de-zonas-de-plagas-con-imagenes-satelitales.html> (Acceso: 21/11/2021).
- CCCS-C3S. (2017). Copernicus Climate Change Service (C3S) ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate. Copernicus

- Climate Change Service Climate Data Store (CDS), (date of access), <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home> (Acceso: 27/11/2021).
- Duyck, P.F y Quilici, S. (2002) Supervivencia y desarrollo de diferentes etapas de la vida de tres *Ceratit*s spp. (Diptera: Tephritidae) Criado a cinco temperaturas constantes. *Bulletin of Entomological Research*, 92, 461-469. <https://doi.org/10.1079/ber2002188>
- Enkerlin, W., Gutiérrez-Ruelas, J.M., Villaseñor Cortes, A., Cotoc Roldan, E., Midgarden, D., Lira, E., Zavala López, J.L., Hendrichs, J., Liedo P. and Trujillo Arriaga, F.J. (2015). Area Freedom in Mexico from Mediterranean Fruit Fly (Diptera: Tephritidae): A Review of Over 30 Years of a Successful Containment Program Using an Integrated Area-Wide SIT Approach. *Florida Entomologist*, 98(2):665-681. DOI: <http://dx.doi.org/10.1653/024.098.0242>
- Enkerlin, W.J., Gutiérrez Ruelas, J.M., Pantaleón, R., Soto Litera, C., Villaseñor Cortés, A., Zavala Lopez, J.L., Orozco Dávila, D., Montoya Gerardo, P., Silva Villarreal, L., Cotoc Roldán, E., Hernández López, F., Arenas Castillo, A., Castellanos Domínguez, D., Valle Mora, A., Rendón Arana, P., Cáceres Barrios, C., Jardín Medio, D., Villatoro Villatoro, C., Lira Prera, E., Zelaya Estradé, O., Castañeda Aldana, R., López Culajay, J., Ramírez y Ramírez, F., Liedo Fernández, P., Ortiz Moreno, G., Reyes Flores, J., and Hendrichs, J. (2017). The Moscamed Regional Programme: review of a success story of area-wide. *Sterile Insect Technique Application*. Special Issue - <https://doi.org/10.1111/eea.12611>
- FAO-ONU. (2022). *Legislación sobre "Una salud": prevenir las pandemias a través de la ley*. <https://www.fao.org/3/ca9729es/ca9729es.pdf>
- Grageda-Grageda, J., Ruiz-Corral, J.A. Jiménez-Lagunes, A. y Fu-Castillo, A.A. (2014) Influencia del cambio climático en el desarrollo de plagas y enfermedades de cultivos en Sonora. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5 (10).
- Gutiérrez Samperio, J. 1979. Campaña Nacional Contra la Mosca del Mediterráneo. *Folia Entomológica Mexicana*. 42, 9-11.
- Harris, E.J. & Lee, C.Y.L. (1986). Seasonal and annual occurrence of Mediterranean fruit flies (Diptera: Tephritidae) in Makaha and Waianae Valleys, Oahu, Hawaii. *Environmental Entomology*. 15, 507-512. <https://doi.org/10.1093/ee/15.3.507>
- LNMYSR-INIFAP. (2022). Laboratorio Nacional de Modelaje y Sensores Remotos, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. INIFAP. *Unidades de Calor*. <http://clima.inifap.gob.mx/lnmysr/Principal/unidadesCalor> (Acceso: 02/01/2022).
- METEORED. (2020). *La importancia de la fenología*. <https://www.meteored.mx/noticias/ciencia/la-importancia-de-la-fenologia.html#:~:text=En%201918%20Andrew%20Hopkins%20estableci%C3%B3n%20de%20las%20plantas>. (Acceso: 01/11/2021).
- Olvera Vargas, L. A., Contreras Medina, D. I., & Aguilar Rivera, N. (2020). Cálculo de grados días de *Hypothenemus hampei* a través de imágenes satelitales. *Revista Mexicana De Ciencias Agrícolas*, 11(3), 544-554. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i3.2041>

- Pacheco-Covarrubias, J.J., Soto-Nolasco, J. y Valenzuela-Valenzuela, J.M. (2016). Densidad poblacional de Mosca blanca Bemisia Spp. (Hemiptera: aleyroididae) en el valle de Guaymas-Empalme Sonora, México. *Biotecnia*, 8 (3). DOI: <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v18i3.329>
- PHYTOMA. (2016). Influencia de las altas temperaturas sobre las plagas. <https://www.phytoma.com/noticias/noticias-de-actualidad/influencia-de-las-altas-temperaturas-sobre-las-plagas> (Acceso: 12/01/2022).
- Ramírez-Cabral, N., Medina-García, G. & Kumar, L. (2020). Increase of the number of broods of Fall Armyworm (*Spodoptera frugiperda*) as an indicator of global warming. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 19(1), 1-16. doi: 10.5154/r.rchsza.2020.11.01.
- Schwarz A.J., Liedo J.P. & Hendrichs J.P. (1989). Current programme in Mexico. In Robinson AS and Hooper G [eds.], *Fruit Flies, Their Biology, Natural Enemies and Control*. *World Crop Pests*, vol. 3B Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
- Segura, D.F., Vera, M.T. & Cladera, J.L. (2006) Fluctuación estacional en la infestación de diversos hospedadores por la mosca del Mediterráneo, *Ceratitidis capitata* (Diptera: Tephritidae), en la provincia de Buenos Aires. *Ecología Austral*. 14 (1). http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1667-782X2004000100002&lang=es
- SENASICA. (2020). *Ficha técnica Mosca del Mediterráneo*. <https://www.gob.mx/senasica/documentos/mosca-del-mediterraneo-110879> (Acceso: 03/04/2022).
- Tepole-García, R.E., Ramírez-Rojas, S., Bartolo-Reyes, J.C. y Castrejón-Gómez, V.R. (2016). Ciclo de vida y análisis de riesgo climático de *Leptoglossus zonatus* Dallas (Hemiptera: Coreidae) para las zonas productoras de sorgo en el estado de Morelos, México. *Acta zoológica mexicana*, 32(3), 300-309. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0065-17372016000300300&lng=es&tlng=es.
- Vargas, L. A. (1993). Monitoreo de plagas en el cultivo de brócoli y coliflor. Birds Eye de México S.A. de C.V. *Boletín Informativo*, 1. 11 p.
- Wiedemann, C.R.W. (1824). *Munus rectoris in Academia Christiana Albertina aditurus analecta entomologica ex Museo Regio Havniensi maxime congesta profert iconibusque illustrat. Regio typographeo scholarum, Kiliae [= Kiel]*. 60 pp., 1 pl.