



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DEPARTAMENTO DE PARASITOLOGÍA AGRÍCOLA MAESTRÍA EN CIENCIAS EN PROTECCIÓN VEGETAL

Epidemiología regional aplicada al pronóstico del picudo del agave azul (*Scyphophorus acupunctatus*) en Jalisco, México.

TESIS:

Que como requisito parcial para obtener el grado de:
Maestro en Ciencias en Protección Vegetal

Presenta:

Baldemar Santana Peñaloza

Bajo la supervisión de:

Dr. Mateo Vargas Hernández



Chapingo, México, diciembre 2020.



**Epidemiología Regional aplicada al pronóstico del picudo del agave azul
(*Scyphophorus acupunctatus*) en Jalisco, México.**

Tesis realizada por Baldemar Santana Peñaloza, bajo la dirección del comité asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN PROTECCIÓN VEGETAL
COMITÉ ASESOR**

DIRECTOR:



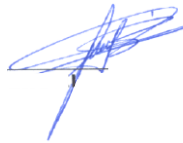
DR. MATEO VARGAS HERNÁNDEZ

CODIRECTOR:



DR. GUSTAVO MORA AGUILERA

ASESOR:



DR. SAMUEL RAMIREZ ALARCÓN

Chapingo, Edo. México, diciembre de 2020

DEDICATORIAS

Familia

A mis padres:

- ✚ Aurora Peñaloza Castillo y Ubaldo Santana García, por todo su apoyo incondicional y consejos, en especial a mi madre por darme ánimos tanto en momentos difíciles de mi postgrado como en mi vida personal. Gracias madre por esas palabras sabias que me ayudaron a seguir y no rendirme, gracias por todos los consejos que me diste desde la primaria, los cuales me ayudaron para formarme en un hombre de bien y profesional.
- ✚ A todos mis hermanos, en especial a Perla Santana, por siempre estar al pendiente de mi situación como estudiante, gracias por los consejos y los ánimos que me diste durante esta nueva etapa de mi vida profesional.
- ✚ Agradecerle gratamente a Elsa Contreras Serratos, por estar a mi lado en esta etapa tan importante de mi vida, gracias por darme ánimos en los momentos de desespero, por acompañarme en los buenos y malos momentos.

A G R A D E C I M I E N T O S

Instituciones y empresas

Instituciones:

-  Se agradece gratamente al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por apoyarme con una beca para mi formación como investigador durante el periodo que duró el postgrado.

-  A la Universidad Autónoma Chapingo, en especial al Departamento de Parasitología Agrícola, por brindarme la oportunidad de realizar mis estudios de Maestría en Ciencias en Protección Vegetal.

-  Al Colegio de Postgraduados, Campus Montecillos, por su valioso apoyo en el desarrollo de prácticas de laboratorio y equipos.

Empresas:

-  A las empresas; Herradura, Sauza S. A. de C. V, Cuervo, Don Julio, Espolón y Tapatío por haber permitido la instalación de parcelas de investigación en sus predios comerciales en las regiones de Jalisco, donde se desarrolló la investigación, así también, como a productores particulares.

-  Al Laboratorio de Análisis de Riesgo Epidemiológico Fitosanitario (CP-LANREF), por su apoyo en la logística de campo y financiamiento de recorridos y materiales para llevar a cabo y ser posible esta línea de investigación.

AGRADECIMIENTOS

Amigos

- ✚ Agradezco gratamente al equipo CP-LANREF por su apoyo incondicional en el desarrollo de mi línea de investigación, tanto en el área de campo como en trabajo de gabinete, en especial a Gerardo Acevedo, Juan J. Coria, Coral Mendoza, Verónica Martínez, Laura González y al equipo de desarrollo Eduardo Guzmán y Oscar E Flores por su aportación con la *App-sivea* y demás.
- ✚ Al Dr. Gustavo Mora Aguilera, por su valioso apoyo y generosidad al brindarme su confianza y recurrir a sus capacidades y experiencia científica para la concertación de esta valiosa línea de investigación.
- ✚ Al Dr. Mateo Vargas Hernández, quien fue director de tesis, por la orientación y ayuda que me brindó en revisiones, correcciones y estructuración de tesis, así como el análisis e interpretación de la información.
- ✚ Al Dr. Héctor González Hernández, por su apoyo en la aportación de materiales de campo para llevar a cabo los monitoreos de la plaga, así como también su aportación en el desarrollo de la tesis.
- ✚ A todos los profesores de la Universidad Autónoma Chapingo, quienes contribuyeron a fortalecer mi preparación y formación durante los cursos, en especial al M.C. Antonio Segura Miranda y al Dr. Samuel Ramírez Alarcón.

DATOS BIOGRÁFICOS

Información general:

- ✚ Nombre: Baldemar Santana Peñaloza
- ✚ Fecha de Nacimiento: 4 marzo de 1989
- ✚ Lugar de origen: Ciudad Altamirano, Guerrero, México.

Formación académica:

- ✚ Nivel medio superior: Centro de Bachillerato Tecnológico Agropecuario (CBTa) No. 18. (Periodo 2006-2009). Ciudad Altamirano Guerrero, México.
- ✚ Licenciatura: Ingeniero Agrónomo Fitotecnista, egresado del Instituto Tecnológico Nacional de México, (Instituto Tecnológico de Ciudad Altamirano ITCA). (Periodo 2009-2013).
- ✚ Tesis de Licenciatura: Diseño e Implementación de los Sistemas de Reducción de Riesgos de Contaminación en el cultivo de Jitomate (*Lycopersicum sculentum*) en el municipio de Chilapa de Álvarez, Guerrero.
- ✚ Maestría en Ciencias en Protección Vegetal en el Departamento de Parasitología Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo (2019-2020).
- ✚ Tesis de maestría: Epidemiología Regional aplicada al pronóstico del picudo del agave azul (*Scyphophorus acupunctatus*) en Jalisco, México.

CONTENIDO

DEDICATORIAS	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
DATOS BIOGRÁFICOS	vi
CONTENIDO	vii
ÍNDICE DE CUADROS	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
RESUMEN GENERAL	xiv
ABSTRACT	xiv
1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
2. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1. Denominación de origen del Tequila (DOT)	3
2.2. Importancia del agave	5
2.2.1. Clasificación taxonómica	6
2.2.2. Descripción Botánica del <i>agave tequilana</i> Weber variedad azul 1902	7
2.2.3. Problemas fitosanitarios	8
2.3. El picudo del agave	9
2.3.1. Importancia económica de la plaga	9
2.3.2. Origen y distribución geográfica	10
2.3.3. Clasificación taxonómica del picudo del agave	11
2.3.4. Hospedantes	11
2.3.5. Daños	12
2.3.6. Descripción morfología	13
2.3.6.1. Huevo	13
2.4. Dimorfismo sexual	14
2.5. Ciclo biológico	14
2.6. Hábitos	16
2.7. Métodos de control	16
2.7.1. Enemigos naturales	17

2.7.2.	Cultural -----	18
2.7.3.	Químico -----	18
2.7.4.	Etológico -----	19
2.8.	Monitoreo epidemiológico -----	19
2.8.1.	Dinámicas poblacionales-----	19
2.8.2.	Distribución espacial de poblaciones -----	20
2.8.3.	Modelos de predicción-----	21
2.8.4.	Método grados-día como instrumento de predicción-----	22
3.	MATERIALES Y MÉTODOS -----	23
3.1.	Criterios de selección del área de estudio -----	23
3.2.	Establecimiento de una red de trampeo regional-----	24
3.2.1.	Descripción y preparación/instalación de trampas-----	26
3.2.2.	Establecimiento de sensores climáticos <i>in situ</i> -----	27
3.2.3.	Revisión y mantenimiento de trampas-----	28
3.3.	Sexado de picudos colectados-----	29
3.4.	Generación de bases de datos -----	30
3.4.1.	Estimación de Horas favorables (<i>Hrs-fav</i>) -----	31
3.4.2.	Análisis de inductividad climática -----	31
3.4.3.	Variables de evaluación -----	32
3.4.4.	Análisis temporal y parametrización-----	32
3.4.5.	Modelos de pronóstico multivariable -----	32
4.	RESULTADOS -----	33
4.1.	Análisis temporal de la dinámica poblacional del picudo del agave azul <i>Scyphophorus acupunctatus</i> -----	33
4.2.	Dinamica subregional -----	34
4.3.	Dinamica a nivel local -----	35
4.4.	Prevalencia de machos y hembras de <i>S. acupunctatus</i> -----	37
4.5.	Análisis espacial de la dinámica poblacional y regional de <i>S. acupunctatus</i> -----	38
4.6.	Implicaciones del comportamiento climático en la carga de plaga regional de <i>S. acupunctatus</i> -----	43

4.7.	Análisis espacial de inductividad climática favorable para reproducción de <i>S. acupunctatus</i> en ventanas biológicas -----	49
4.8.	Modelos matemáticos para el pronóstico de alertas tempranas regional de <i>S. acupunctatus</i> -----	51
5.	DISCUCIÓN -----	54
6.	CONCLUSIONES -----	56
7.	LITERATURA CITADA -----	58

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Comparativo del ciclo biológico de <i>Scyphophorus acupunctatus</i> en condiciones de Laboratorio, estudios científicos de diferentes autores.-----	15
Cuadro 2. Criterios considerados para la selección de parcelas de trampeo-monitoreo del picudo del agave <i>S. acupunctatus</i> . -----	25
Cuadro 3. Número y localización geográfica de los 20 sitios/parcelas comerciales de agave en investigación, para el monitoreo continuo del picudo en la región de Los Altos, Jalisco.--	26
Cuadro 4. Variables consideradas en el análisis de datos -----	32
Cuadro 5. Integración de datos climáticos y carga de plaga por periodo (Y_o , Y_{max} y Y_f) para la generación de umbrales climáticos por región/año para el proceso de oviposición e incubación de huevo y actividad-móvil del adulto. -----	45
Cuadro 6. Umbrales de inductividad climática por ventana biológica, específicamente en condiciones de campo. -----	46
Cuadro 7. Modelos de pronóstico de <i>Scyphophorus acupunctatus</i> en Y_{max} y Y_o en función de variables epidemiológicas medidas en Y_f para la región Los Altos del estado de Jalisco. ----	53
Cuadro 8. Repetitividad de variables constantes en modelos por año. -----	54

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Zona geográfica perteneciente a la Denominación de Origen del Tequila (DOT), conformada por 181 municipios de cinco estados de la república mexicana: Jalisco, Guanajuato, Nayarit, Michoacán y Tamaulipas (CP-LANREF, 2020).....	4
Figura 2. Superficie plantada en hectáreas de <i>Agave tequilana</i> , considerada en los cinco estados pertenecientes a la DOT, Jalisco, Guanajuato, Nayarit, Michoacán y Tamaulipas (SIAP, 2019).	4
Figura 3. Desarrollo fenológico por año del cultivo del <i>Agave tequilana</i> Weber variedad azul, desde su plantación hasta cosecha (CP-LANREF, 2020).	7
Figura 4. Distribución geográfica espacial del picudo del agave <i>Scyphophorus acupunctatus</i> . (CABI, 2020).	10
Figura 5. Daños causados por <i>Scyphophorus acupunctatus</i> en plantas de agave tequilana A) Galerías en la parte media de las hojas del cogollo, B) Amarillamiento en la base de la planta, desecación de hojas y muerte de la planta (CP-LANREF, 2020).....	12
Figura 6. Adultos del picudo en planta severamente dañada y enemigos naturales. A) Picudos adultos, B) Depredador de larvas (<i>Hololepta</i> spp) y parasitoide <i>Alienoclypeus insolitus</i> . Fotos tomadas en campo por (Santana (2019).	17
Figura 7. Ejemplo de la distribución espacial de especies. A) Distribución uniforme, B) Distribución al azar, C) Distribución agregada.	20
Figura 8. Mapa espacial regional de inductividad epidémica de plagas y enfermedades del cultivo de <i>Agave tequilana</i> en Jalisco (CP-LANREF, 2018), donde el color rojo representa alta intensidad de insectos y enfermedades, el verde menos intensidad.	23
Figura 9. Mapa espacial, con municipios de cada región, desarrollado con datos del REG-N. El círculo encierra los puntos/trampas de monitoreo del picudo del agave en la región Los Altos de Jalisco (CP-LANREF, 2020).....	24
Figura 10. Procedimiento para la instalación de trampas para captura de picudos. A) Cubeta con cuatro perforaciones circulares, B) Sobre con feromona sintética de agregación, C) Tapadera con soporte de alambre recocido para colgar la feromona, D) Trozos de tejido	

vegetal de la piña “cebo” dentro de una bolsa de plástico, E) Aspersor manual con insecticida “Malathion 1000” al 10%, F) Aplicación de insecticida 50 ml/trampa (CP-LANREF, 2019).... 27

Figura 11. Establecimiento del sensor climático. A) Equipo completo de monitoreo, trampa, sensor, varilla de metal y etiqueta, B) Datalogger HOBO, C) Extractor y modo de extracción de los datos climáticos, D) Ejemplo de una gráfica del comportamiento climático por predio en www.sivea.org.mx E) Etiqueta con información de la trampa (CP-LANREF, 2019)..... 28

Figura 12. Vistas de App-SIVEA implementada como soporte al sistema de monitoreo del picudo del agave. A) Inicio de módulos de la aplicación, B) Registro de trampas, C) Módulos de registro de conteos de picudos y vistas de gráfica, D) Gráfica de una trampa de picudos (CP-LANREF, 2019)..... 29

Figura 13. Caracterización morfológica de machos y hembras de *S. acupunctatus*. A) vista ventral de la hembra, último segmento abdominal terminado en punta o en forma de “U” curvatura definida, B) Vista ventral del macho, último segmento abdominal ensanchado o en forma de “M” esta puede ser ligera o bien marcada. (Créditos: Valdéz-Carrasco y González-Hernández, 2019)..... 30

Figura 14. Promedio regional y comportamiento poblacional del picudo del agave capturados en trampas a través del tiempo en Los Altos de Jalisco..... 34

Figura 15. Comportamiento poblacional del picudo del agave a través del tiempo, en municipios de monitoreo de la región de Los Altos de Jalisco. A) Dinámica poblacional en Atotonilco, Ayotlán, San Ignacio Cerro Gordo, Tepatitlán de Morelos y Zapotlanejo. B) Dinámica poblacional en Arandas, Jesús María, Mexicacán, Yahualica de González Gallo y Ocotlán..... 35

Figura 16. Dinamica local a nivel de trampas en la región Los Altos de Jalisco. A) Trampas más inductivas; A-ATO-CP12, A-AYO-CP13, A-SICG-CP07, A-SICG-CP15, A-TEP-CP08, A-TEP-CP09, A-TEP-CP14 y A-ZAP-CP10, B)Trampas menos inductivas; A-ARA-CP01, A-ARA-CP04, A-ARA-CP05, A-ARA-CP06, A-ARA-CP20, A-JM-CP02, A-JM-CP03, A-JM-CP19, A-MEX-CP16, A-YAH-CP17 y A-YAH-CP18..... 37

Figura 17. Suma total de machos y hembras de picudos capturados por mes, en trampas de monitoreo en la región Los Altos de Jalisco en 2018. 38

Figura 18. Proyección geo-estadística de la carga de plaga (A, C y E) máxima inductividad (B, D y F) suma total en los eventos epidemiológicos Y_o , Y_{max} y Y_f en Altos de Jalisco, durante el periodo 2018.....	40
Figura 19. Proyección geo-estadística de la carga de plaga (A, C y E) máxima inductividad (B, D y F) suma total en los eventos epidemiológicos Y_o , Y_{max} y Y_f en Los Altos de Jalisco, durante el periodo 2019.....	42
Figura 20. Relación del comportamiento de picudos adultos por mes, año y región en base a la temperatura (°C) y Humedad relativa (%HR).	45
Figura 21. Suma de horas favorables totales para inductividad por evento biológico-epidemiológico en relación a carga de plaga en la región Los Altos. A) ventana Y_f y B) ventana Y_{max}	48
Figura 22. Mapa espacial regional con inductividad climática favorable para oviposición e incubación de huevo de <i>S. acupunctatus</i> por ciclo y ventana biológica en (Y_f). A) Suma total de horas favorables y B) Promedio de Hrs-fav en Ciclo 1, 2018. C) Suma total de Hrs-fav y D) Promedio de Hrs-fav en Ciclo 2, 2019.....	50

Epidemiología regional aplicada al pronóstico del picudo del agave azul (*Scyphophorus acupunctatus*) en Jalisco, México.

Regional epidemiology applied to the prognosis of the blue agave weevil (*Scyphophorus acupunctatus*) in Jalisco, Mexico.

Baldemar Santana Peñaloza, M. en C.
Dr. Mateo Vargas Hernández

RESUMEN

El picudo del agave (*Scyphophorus acupunctatus* Gyllenhal) (Coleoptera: Curculionidae) es la plaga de mayor importancia económica por sus impactos directos sobre la planta del agave tequilero. En Jalisco se estableció una red de monitoreo-trampeo regional con 20 parcelas distribuidas en la región Los Altos. En cada parcela se instaló una trampa con datalogger HOBO U23 pro v2 para medición *in situ* de temperatura, humedad y punto de rocío. El objetivo fue monitorear la fluctuación poblacional del picudo para generar alertas fitosanitarias tempranas. La revisión de trampas y cambio del cebo vegetal se realizó quincenalmente, mientras que, el liberador de feromona cada 45 días. De enero-2018 a diciembre-2019 se realizaron 48 colectas por trampa/datalogger, totalizando 10,671,360 registros. Mediante fluctuación poblacional por ciclo productivo, se parametrizaron eventos biológicos-epidemiológicos: Y_0 (fase inicial), Y_{max} (pico máximo) y Y_f (fase final). Se identificaron dos generaciones poblacionales, una por año, siendo el ciclo 2018 más inductivo en carga de plaga con respecto al ciclo 2019. La prevalencia de hembras fue mayor con respecto a machos, con una proporción sexual de 1.46. Espacialmente, se encontraron focos subregionales con diámetro de 41.44 km equivalentes a 134,875 ha, de las cuales 11,690 ha fueron de muy alta intensidad con 271–844 insectos totales en Tepatitlán, Zapotlanejo y Tototlán. Las variables climáticas mostraron relación directamente proporcional con carga de plaga. Los umbrales de inductividad climática en Los Altos para generación de horas favorables (*Hrs-fav*) en oviposición e incubación de huevo fueron de 14–17 °C y 51.4–67 %RH. Se generaron 24 modelos de pronóstico para la región por ciclo productivo con significancia $p < 0.05$ y bondad de ajuste de $R^2 = 0.70-0.99$. Las variables que mejor ajustaron fueron: altitud, temperaturas-humedad mínimas y máximas, suma total insectos, promedio de picudos/trampa y horas favorables de inductividad epidémica.

Palabras clave: Modelos de pronóstico, inductividad climática, alertas tempranas, agave azul tequilero y focos regionales.

ABSTRACT

The agave weevil (*Scyphophorus acupunctatus* Gyllenhal) (Coleoptera: Curculionidae) is the most economically important pest due to its direct impacts on tequila agave plants. In Jalisco, a regional monitoring-trapping network was established with 20 sites distributed in the Los Altos region. A trap with a HOBO U23 pro v2 datalogger was installed in each site for measurement of temperature, humidity and dew point *in situ*. The objective was to monitor the population fluctuation of the weevil to generate early phytosanitary alerts. The revision of traps and change of the vegetable bait was carried out biweekly, while the pheromone liberator was changed every 45 days. From January-2018 to December-2019, 48 collections were made per trap/datalogger totaling 10,671,360 records. By population fluctuation and productive cycle, biological-epidemiological events were parameterized: Y_0 (initial phase), Y_{max} (maximum peak) and Y_f (final phase). Two population generations were identified, one per year, where 2018 cycle was more inductive in pest load respect to 2019 cycle. The prevalence of females was higher than males, with a sexual proportion of 1.46. Spatially, subregional focuses with a diameter of 41.44 km equivalent to 134,875 ha were found, of which 11,690 ha were of very high intensity with 271–844 total insects in Tepatitlán, Zapotlanejo and Tototlán. The climatic variables showed a directly proportional relationship with the pest load. The climatic inductivity thresholds at Los Altos for the generation of favorable hours (*Hrs-fav*) in oviposition and egg incubation were 14–17 °C and 51.4–67 %RH. A total of 24 forecast models were generated for the region and per productive cycle with significance $p < 0.05$ and goodness of fit $R^2 = 0.70-0.99$. The variables that best adjusted were: altitude, minimum and maximum temperatures-humidity, total sum of insects, average number of weevils / trap and favorable hours of epidemic inductivity.

Keywords: Forecast models, climatic inductivity, early alerts, tequila blue agave and regional focuses.

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

El cultivo de *agave tequilana* Weber variedad azul, es uno de los cinco más importantes para la producción agrícola de México (SIAP, 2019). En 2019 México exportó 245.8 millones de litros de tequila a 120 países del mundo, lo que superó en un 10% al 2018, ya que en ese año se exportaron 222.7 millones de litros, cabe señalar que en 2019 se consumieron 1,000, 343 mil toneladas de materia prima de agave, superando al 2018 con un 18% al consumirse 1,000,139 mil toneladas, indicando la importancia de crear medidas de control de plagas y enfermedades oportunas y efectivas para el sector productivo agave (CRT, 2019). Además, su industria en nuestro país representa una importante fuente de empleo para la población que se dedica a esta actividad durante el proceso de producción, desde plantaciones, mantenimiento, cosecha, comercialización e industrialización (Valenzuela, 1995). Por lo tanto, México ostenta la Denominación de Origen del Tequila (DOT) que comprende 181 municipios de cinco estados de la República Mexicana, siendo Jalisco el principal productor, ya que contempla todos sus municipios en totalidad (125) además de Guanajuato (7), Michoacán (30), Nayarit (8) y Tamaulipas (11) (Figura 1). Por lo que, únicamente en estos estados/municipios se puede obtener la materia prima de *Agave tequilana* para la producción de tequila. Jalisco es la principal entidad con aproximadamente 113,517 hectáreas, lo que representa un 72% de la superficie plantada, seguido de Guanajuato con 25,068 ha (16%), Nayarit 10,481 ha (6%), Michoacán 6,121 ha (3%) y Tamaulipas con 1,427 ha (1%), completando un total de 156,614 hectáreas plantadas en 2019 (CRT. 2019).

Los problemas fitosanitarios en las últimas dos décadas sugieren que la ocurrencia, emergencia y reemergencia de plagas y enfermedades de los cultivos agrícolas están intrínsecamente ligados a factores edáficos, manejo agronómico del cultivo y posiblemente variaciones climáticas del medio ambiente (Mora-Aguilera 2014). Cabe mencionar que el agave tequilero al igual que otras especies de agaves, son susceptibles a diversas plagas y enfermedades, las cuales indudablemente son las responsables del factor de mermas más importante dentro del sector productivo del agave tequilero (Virgen-Calleros, 2006), siendo el picudo del agave *Scyphophorus*

acupunctatus Gyllenhal (Coleoptera: Curculionidae) la plaga de mayor importancia económica del cultivo del agave, en la zona que comprende la Denominación de Origen Tequila (DOT), causando daño en plantas de agave de hasta un 24.5%, debido a las galerías que causan las larvas cuando emergen del huevo al interior de la piña-bola y cogollo, afectando así, directamente la calidad de la materia prima para la elaboración del tequila (Solís-Aguilar, 2001a), en condiciones más severas, el daño puede llegar hasta el 100% en plantas que también presentan síntomas o daños causados por enfermedades, debido a que éstas liberan una cierta cantidad de fenoles que atraen a los picudos y demás insectos oportunistas, los cuales ayudan a desintegrar con mayor rapidez la planta (Figueroa-Castro *et al.*, 2009). Para mitigar el problema del picudo del agave, las acciones de manejo se realizan en base a un sistema de monitoreo con trampas cebadas con feromona de agregación y tejido de agave Rodríguez-Rebollar *et al.*, (2011). Por otro lado, Figueroa-Castro *et al.*, (2015) reportaron que tanto las hembras como los machos de *S. acupunctatus* pueden iniciar la colonización en plantas de agave tequilero, agave mezcalero, espadín y papalote, por lo tanto, las estrategias de manejo deben ser enfocadas hacia ambos sexos. El Servicio de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (SENASICA) a través del Comité Estatal de Sanidad Vegetal de Jalisco (CESAVEJAL), establecieron este problema como prioritario dentro de la Campaña Contra Plagas Reglamentadas del Agave, con el objetivo de monitorear la plaga a través del trampeo para detectar focos de infestación de forma oportuna e implementar medidas de control.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Denominación de origen del Tequila (DOT)

Las plantaciones del *Agave tequilana* Weber variedad azul crecen y se desarrollan dentro de la superficie conocida como Denominación de Origen del Tequila (DOT), las cuales cada año siguen en aumento debido a la demanda de materia prima por las industrias tequileras (Valenzuela, 1995). Actualmente Vicente-Ramírez (2019) reportó un incremento de hasta 170 y 180 millones de plantas y 170 mil hectáreas a finales del ciclo 2019, implicando el uso de tierras donde antes se cultivaba el maíz y ahora siembran agave, así como también la deforestación de áreas con vegetación para la plantación de este cultivo, esto es debido a la demanda del sector productivo agave en Jalisco. Tales plantaciones se encuentran georreferenciadas por el Consejo Regulador del Tequila (CRT), quien es la organización dedicada a verificar y certificar el cumplimiento con la Norma Oficial del Tequila, así como promover la calidad, la cultura y el prestigio de la bebida nacional por excelencia (CRT, 2019).

El Tequila es una bebida espirituosa regional obtenida del *Agave tequilana* Weber variedad azul y a nivel mundial su producción y comercialización están sujetas al cumplimiento de la NOM-006-SCFI-2012, Bebidas alcohólicas-Tequila-Especificaciones (DOF: 13/12/2012). Por lo cual, a partir del año 1974, en 1978 fue registrada a nivel internacional para la protección de la denominación de origen y, en base a factores geográficos, tales como; clima, altitud y características del suelo se seleccionaron municipios y estados (CRT, 2016). Por lo tanto, México ostenta la Denominación de Origen del Tequila (DOT) que comprende 181 municipios de cinco estados de la República Mexicana: Jalisco en su totalidad (125), seguido de Guanajuato (7), Michoacán (30), Nayarit (8) y Tamaulipas (11) (Figura 1 y 2). Únicamente en estos estados/municipios se puede obtener la materia prima para producción del tequila (CRT, 2019).

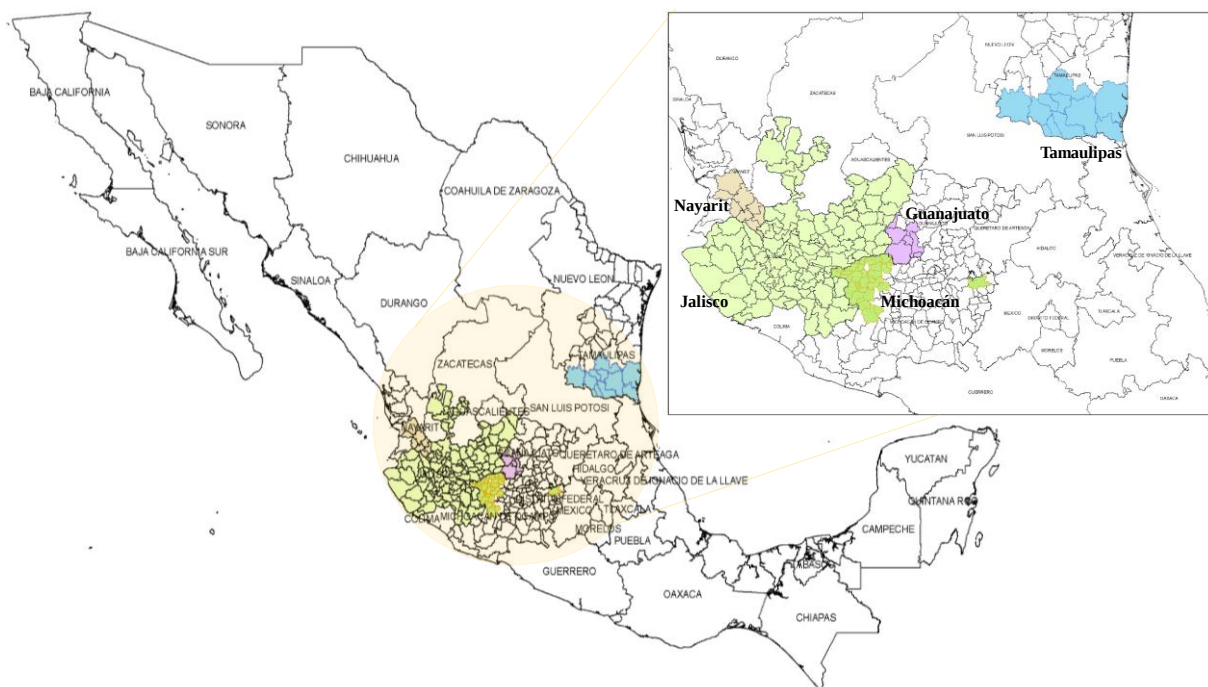


Figura 1. Zona geográfica perteneciente a la Denominación de Origen del Tequila (DOT), conformada por 181 municipios de cinco estados de la República Mexicana: Jalisco, Guanajuato, Nayarit, Michoacán y Tamaulipas (CP-LANREF, 2020).

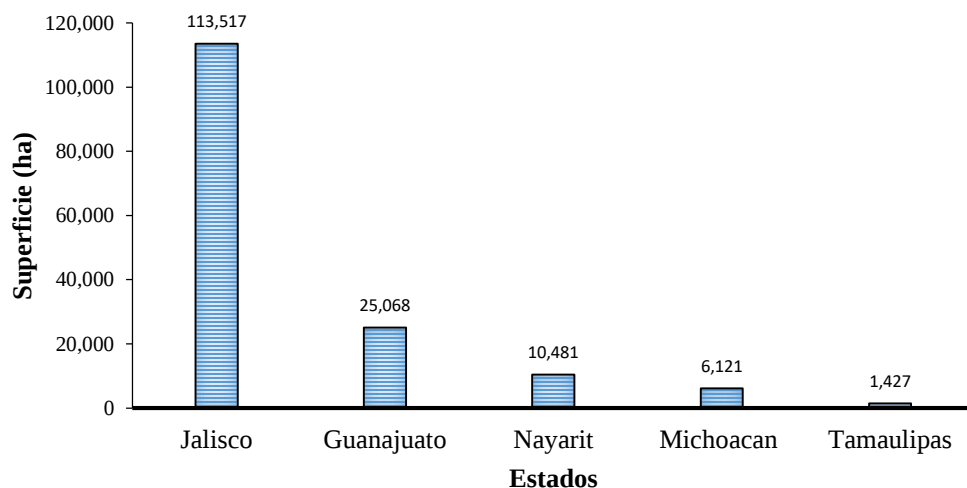


Figura 2. Superficie plantada en hectáreas de *Agave tequilana* en los cinco estados pertenecientes a la DOT: Jalisco, Guanajuato, Nayarit, Michoacán y Tamaulipas (SIAP, 2019).

2.2. Importancia del agave

El género *Agave*, es considerado endémico de América, con aproximadamente 236 especies, de las cuales el 75% se encuentran distribuidas en México. De éstas, 36 pertenecen a categorías intraespecíficas, lo que constituyen 186 taxones (García, 2007). Los países con mayor número de taxones son; México, Estados Unidos, Cuba y Guatemala. El Agave tiene una amplia distribución en México, se encuentra en más del 75% del territorio; sin embargo, la distribución de especies es altamente asimétrica, con la mayor diversidad en regiones áridas y semiáridas del centro y norte del país, y su número disminuye hacia las regiones húmedas y cálidas del sur, por lo que su baja abundancia es notoria en los estados como; Tabasco, Campeche y Quintana Roo (García, 2007).

Las especies de Agave también son conocidas por su diversidad de usos, ya que es una de las plantas con mayor diversidad comercial, entre ellos se destaca la fabricación de canastos, cordeles, jarabes, shampoo, extractos medicinales, inulina, esto a partir de especies como; *Agave fourcroydes* Len., *Agave sisalana* Perrine, *Agave angustifolia* Haw, y *Agave amaniensis* Trel (Espinosa, 2015). Sin embargo, su principal uso es para la elaboración de bebidas alcohólicas como el Tequila, que se produce a partir del *Agave tequilana* Weber variedad azul o los mezcales con *Agave angustifolia* Haw., o con *Agave potatorum* Zucc (Parra et al., 2010). También, se han empleado en la medicina tradicional pues se han identificado sapogeninas esteroidales con propiedades antiinflamatorias, antiparasitarias o hemolíticas en el *Agave fourcroydes*. Otro producto obtenido del *Agave tequilana* es el jarabe de agave que es empleada como sustituto del azúcar (Parra et al., 2010 y Espinosa, 2015). Dentro del género de la familia de las agaváceas, el *Agave tequilana* es el más importante, debido a la demanda de materia prima generada por las industrias tequileras, así como productores particulares en los diferentes estados donde se produce el tequila y sobre todo la distribución y comercialización de la bebida conocida como tequila a diferentes partes del mundo (SPNAT, 2012).

2.2.1. Clasificación taxonómica

La familia Agavaceae ha variado a través del tiempo, y en la actualidad la familia tiene nueve géneros, incluyendo *Hesperoyucca* que es segregado de *Yucca* (Escobar-Guzmán, 2009). Así mismo, la clasificación taxonómica del género *Agave* ha sido objeto de controversia debido a su gran variación fenotípica y genotípica e incluso dentro de la misma especie y de una misma población (Verduzco-Martínez, 2008). Según el tipo de inflorescencia, este género se divide en subgénero *Agave*, que tiene inflorescencia en panícula. A este pertenecen la mayoría de las especies de importancia económica como *A. tequilana*, *A. fourcroydes* y *A. angustifolia*, y el subgénero *Littae* que su inflorescencia es en forma de espiga. Según Dahlgren *et al.*, (1985) la circunscripción más aceptada delimita 8 géneros y actualmente se considera un nuevo género (*Hesperoyucca*), segregado de *Yucca* (Escobar-Guzmán, 2009).

Reino: Plantae

Subreino: Tracheobionta

División: Magnoliophyta

Clase: Monocotyledoneae

Subclase: Liliidae

Orden: Asparagales

Familia: Agavaceae

Subfamilia: Agavoideae

Género: *Agave*

Subgénero: *Agave*

Especie: *Agave tequilana* F.A.C. Weber

Variedad: Azul

2.2.2. Descripción Botánica del *agave tequilana* Weber variedad azul 1902

El agave tequilero es una planta suculenta que se extiende radicalmente de 1 a 1.8 metros de longitud, tallo al ras del suelo, hojas lanceoladas de 90 a 120 cm, rígidamente estiradas y generalmente de color glauco azulado a verde grisáceo (Figura 3). El margen es recto a ondulado, los ápices delgados, curvos o flexos desde poca altura de la base piramidal de color café claro a oscuro, de 1 a 2 cm de largo, su inflorescencia es una panícula de 5 a 6 m de altura, densamente ramosa, flores verdes y estambres rosados. Las flores llegan a medir 68 - 75 mm con bractéolas sobre los pedicelos de 3 - 8 mm de longitud. Los Ovario miden 32 - 38 mm largo, con cuello corto, inconstricto, casi terminado en punta sobre la base. El tubo floral mide 10 mm de ancho, funeliforme y surcado, pétalos desiguales de 25 - 28 mm, filamentos 45 - 50 mm de longitud, dobladas hacia adentro sobre el pistilo, anteras de 25 mm y el fruto es una cápsula ovalada (Pérez-Domínguez y Del Real-Laborde, 2007a).

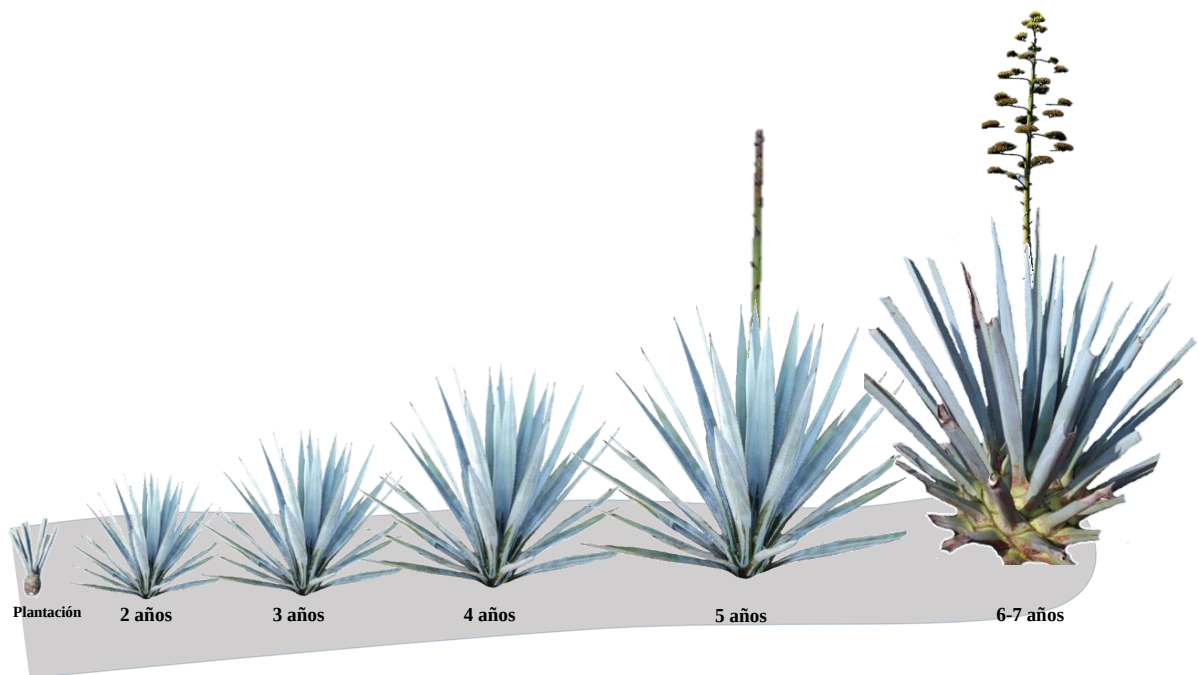


Figura 3. Desarrollo fenológico por año del cultivo del *Agave tequilana* Weber variedad azul, desde su plantación hasta cosecha (CP-LANREF, 2020).

2.2.3. Problemas fitosanitarios

El agave tequilero, al igual que otras especies de agaves, es atacado por diversas plagas y enfermedades, este problema ha ido en aumento conforme se extiende la superficie plantada y mal manejo de la movilidad de hijuelos (material propagativo del agave) de una región a otra y entre estados (González-Hernández *et al.*, 2007a). Por consiguiente, la pérdida económica debido a esta problemática es considerada el factor de mermas más importante en el sector productivo (Virgen-Calleros, 2006). Cabe mencionar que, dentro de esta problemática se encuentra el picudo del agave *Scyphophorus acupunctatus* Gyllenhal (Coleoptera: Curculionidae), el cual se considera como la principal plaga del cultivo dentro de la DOT. Los principales daños son ocasionados por la alimentación de las larvas dentro de la piña o bola y cogollo, lo que ocasiona daños que afectan directamente la calidad y cantidad de materia prima para la elaboración del tequila y pueden permitir la entrada de otros microorganismos patogénicos que coadyuvan al deterioro de la planta. Los adultos se encuentran activos gran parte del año y atacan cualquier etapa fenológica del cultivo (Figura 5), según su longevidad y duración del ciclo biológico el cual varía según la especie de agave (Solís-Aguilar *et al.*, 2001b). Por otro lado, se encuentran las enfermedades como la marchitez y pudrición seca del cogollo, considerada como la de más alto impacto económico debido al daño que causa y aunado a esta problemática López-Bautista *et al.*, 2020 reportó que este mal es causado por un complejo de *F. oxysporum* (FOSC), *F. solani* (FSSC), *F. fujikuroi* (FFSC) y *F. incarnatum-equiseti* (FIESC), el cual se encuentra presente en toda la superficie plantada de la región de Los Altos de Jalisco. Otra de las enfermedades de importancia económica es la mancha gris ocasionado por *Cercospora agavicola* (Ayala-Escobar *et al.*, 2005), la cual se encuentra presente en las tres principales regiones (Los Altos, Valles y Sur) productoras de agave en el estado de Jalisco y a pesar de la baja aptitud parasítica, esta enfermedad puede causar pérdidas económicas regionales que se estiman entre los 915,448 a 124,500 miles de pesos/hectárea, considerando precio/kilo a \$24 pesos en el 2018 (Coria-Contreras *et al.*, 2018). El Servicio de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (SENASICA) a través del Comité Estatal de Sanidad Vegetal de Jalisco (CESAVEJAL),

establecieron estos problemas fitosanitarios como prioritarios dentro de la Campaña Contra Plagas Reglamentadas del Agave, con el fin de realizar Monitoreos regionales constantes para su detección de forma oportuna e implementar medidas de control. Además de estas plagas y enfermedades mencionadas anteriormente, existen otras que se consideran como secundarias por su bajo impacto y distribución como lo son: Cerambicido (*Acanthoderes funeraria*), Rondón (*Strategus aleous*), Piojo harinoso (*Pseudococcus* spp.), Escama armada (*Acutaspis agavis*), Barrenador de las pencas (*Agathymus rethon*), diferentes especies de gallina ciega (*Phillophaga* spp., *Cyclocephala* spp.) y ocasionalmente especies de chapulines (*Schistocerca paranensis* Burn, *Melanoplus differentialis*) (González-Hernández *et al.*, 2007b). En el caso de enfermedades: Anillo rojo (*Pantoea agglomerans*), (Mezo-Villalobos, *et al.*, 2014), Mancha anular (*Didymosphaeria* sp.), Mancha foliar (*Rhizoctonia solani*), (*Botryodiplodia* sp.) y *Didymosphaeria* sp. (Rubio, 2007).

2.3. El picudo del agave

2.3.1. Importancia económica de la plaga

El picudo del agave, *Scyphophorus acupunctatus*, es el principal problema por sus hábitos alimenticios debido al daño silencioso que causa en poco tiempo, al atacar plantas que pertenecen a la familia Agavaceae como: el henequén, sisal, agave pulquero, mezcalero y tequilero, de estas últimas tres se obtienen beneficios de importancia económica para el sector productivo (bebidas alcohólicas, como el pulque, tequila y mezcal) y plantas de la familia Dracaenaceae. La mayor cantidad de las plantas hospederas tiene importancia ecológica y ornamental (Rodríguez-Rebollar *et al.*, 2012). En México, el picudo del agave es el principal problema para las empresas tequileras, mezcaleras y productores particulares, ocasionando pérdidas en el rendimiento, Solís-Aguilar, (2001a) estimaron pérdidas ocasionadas por esta plaga de hasta un 24.5% en materia prima del agave tequilero, en el henequén en Yucatán, se han estimado daños hasta del 50% (Valdés *et al.*, 2004); mientras que, en el cultivo del Nardo es considerado como una de las plagas de mayor importancia económica, debido al daño que causan en el bulbo (Camino *et al.*, 2002). Las larvas de este insecto, dañan directamente la planta, al barrenar la piña y

cogollo (pencas), mientras que los adultos, además de hacer galerías y alimentarse del tejido de la planta, puede transmitir hongos y bacterias oportunistas que ayudan a degradar el tejido y provocar su muerte en pocas semanas (Solís-Aguilar *et al.*, 2001b).

2.3.2. Origen y distribución geográfica

El picudo del agave es originario del suroeste de los Estados Unidos de América y Norte de México, ha sido introducido en diversas regiones de casi todo el mundo, incluida la Península Ibérica, donde se considera una especie invasora, y se le conoce popularmente como picudo del henequén, picudo del agave, picudo negro o max del henequén y ahora hospedante del cardón en la península de Baja California (Maya *et al.*, 2011). Cabe mencionar que esta especie se encuentra ampliamente distribuida a nivel mundial en cinco continentes (Figura 4): ASIA: Indonesia y Arabia Saudita. ÁFRICA: Kenia, Sudáfrica y Tanzania (Servín *et al.*, 2006). AMÉRICA: México, Estados Unidos, Belice, Islas Caimán, Colombia, Costa Rica, Cuba, Curazao, República Dominicana, El Salvador, Guatemala, Haití, Honduras, Nicaragua, Jamaica, Puerto Rico, Brasil y Venezuela (Servín *et al.*, 2006). EUROPA: España, Francia, Grecia, Italia y Holanda (Kontodimas & Kallinikou, 2010). OCEANÍA: Australia (Servín *et al.*, 2006).

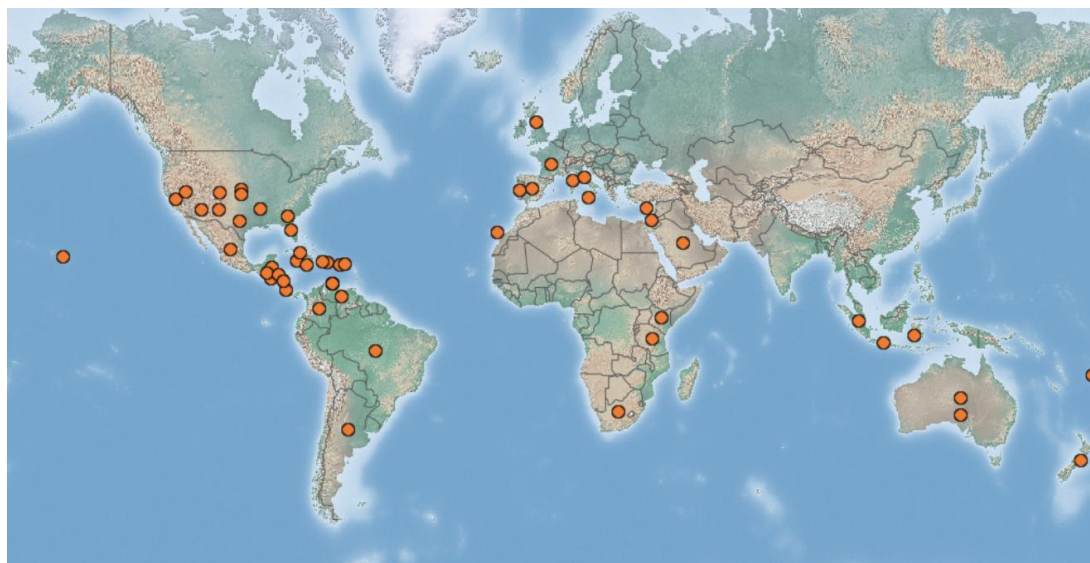


Figura 4. Distribución geográfica espacial del picudo del agave *Scyphophorus acupunctatus*. (CABI, 2020).

2.3.3. Clasificación taxonómica del picudo del agave

El género posee sólo dos especies; *Scyphophorus acupunctatus*, conocido como el picudo del agave, gorgojo del sisal y max del henequén, considerado de importancia económica debido al daño que causa y la rapidez con que destruye las plantas, y *Scyphophorus yuccae* que se alimenta de plantas de *Yucca* en el Suroeste de Estados Unidos y Baja California. Ambas especies son de color negro, aladas, carecen de escamas dorsales y son bastante robustas (Romo & Morrone., 2012).

Phylum: Arthropoda

Clase: Insecta

Subclase: Pterygota

División: Endopterygota

Orden: Coleoptera

Suborden: Polyphaga

Familia: *Dryophthoridae*

Subfamilia: *Rhynchophorinae*

Tribu: Sphenophorini

Género: *Scyphophorus*

Especie: *Scyphophorus acupunctatus* Gyllenhal
(Booth et al., 1990)

2.3.4. Hospedantes

El picudo del agave tiene una gran diversidad de hospedantes, sin embargo, prefiere al agave tequilero (*A. tequilana* variedad azul), henequén (*A. fourcroydes* Lem), maguey pulquero (*A. atrovirens* Karw), maguey mezcalero espadín (*A. angustifolia*), maguey mezcalero papalote (*A. cupreata*) y sisal (*A. sisalana*). También se le ha encontrado alimentándose de otros cultivos como el Nardo (*P. tuberosa*), la Yuca (*Yucca valida* Brandegees) y Cardón (*Pachycereus pringlei*) (Camino et al., 2002; Servín et al., 2006; Maya et al., 2011).

2.3.5. Daños

Según observaciones realizadas en campo (experiencia personal, 2018) el ataque del insecto se inicia en la base de las pencas pegado a la piña y en el cogollo de la planta (Figura 5), donde la hembra perfora el tejido y oviposita los huevos, después de su eclosión, la larva perfora el tejido adentrándose al interior de la piña o cogollo, dejando una coloración rojiza y oscura (M. Riba & Alonso, 2007). Por otro lado, Solís-Aguilar *et al.*, (2001b), mencionaron que *S. acupunctatus* también actúa como transmisor de la bacteria *Pectobacterium carotovorum* causante de la pudrición del cogollo, la cual produce pudrición de los tejidos internos, así como una mezcla de fibras con aspecto viscoso y oscuro, con olor fétido. Las plantas infestadas con larvas, hongos, bacterias y demás insectos oportunistas, presenta síntomas visibles como; marchitamiento, amarillamiento y decadencia de hojas debido al desorden y destrucción de tejidos, señal de que la planta está llegando al colapso (M. Riba & Alonso, 2007).

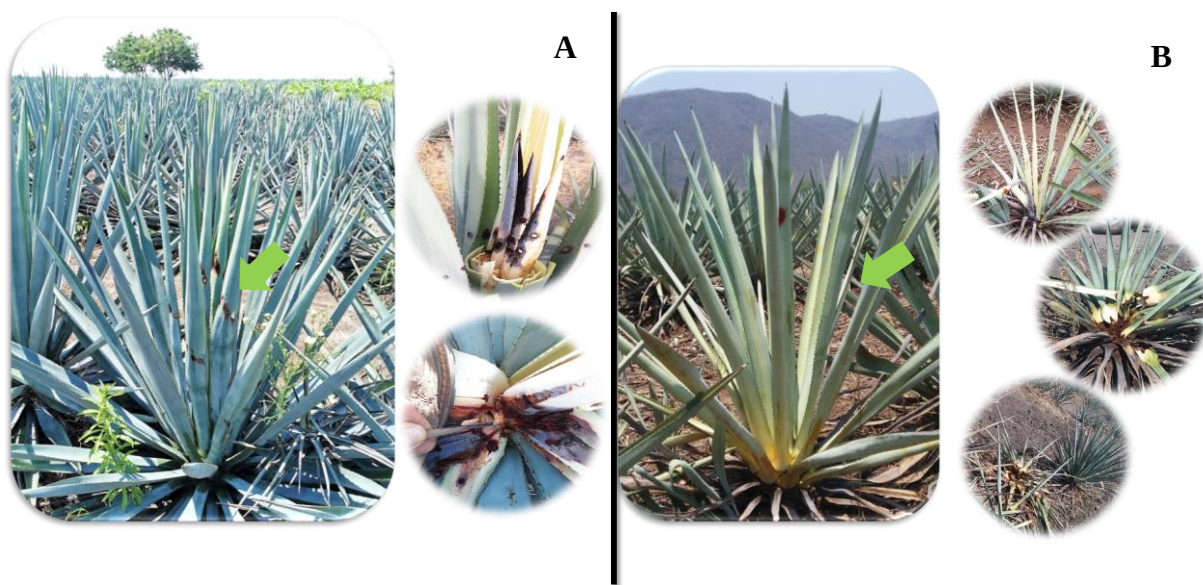


Figura 5. Daños causados por *Scyphophorus acupunctatus* en plantas de *Agave tequilana* A) Galerías en la parte media de las hojas del cogollo, B) Amarillamiento en la base de la planta, desecación de hojas y muerte de la planta (CP-LANREF, 2020).

2.3.6. Descripción de morfología

2.3.6.1. Huevo

El picudo del agave *S. acupunctatus* presenta cuatro estadios de desarrollo; huevo, larva, pupa y adulto, es de metamorfosis completa. La forma del huevo es ovoide, alargado, mide entre 1.2 - 1.5 mm por 0.8 mm de ancho, recién ovipositado es de color blanco-crema, de forma delgada y membranosa, conforme el embrión se desarrolla a la eclosión adquiere un color ligeramente amarillo (Ramírez-Choza, 1993; González-Hernández *et al.*, 2010).

2.3.6.2. Larva

La larva presenta cuerpo arrugado, ligeramente encorvado y son apodas (carecen de patas), pasa por 11 estadios larvales diferenciándose uno de otro por el tamaño de la capsula cefálica, recién emergidas son de color blanco lechoso (color que mantiene durante todo su desarrollo), en los últimos estadios la cápsula cefálica toma un color café oscuro, con unas potentes mandíbulas que le ayudan a destrozar el tejido de la planta (Ramírez-Choza, 1993). Llega a medir de 20 a 23 mm de longitud, en el último instar la larva pasa por dos periodos; durante el primero barrena en busca de tejido fibroso para formar su cocón el cual dura 10-13 días en promedio y el segundo periodo comienza desde que el cocón ya está formado y termina en la etapa que se conoce como pre-pupa, con una duración promedio de 8 a 10 días (M. Riba & Alonso, 2007; González-Hernández *et al.*, 2010).

2.3.6.3. Pupa

Esta etapa de desarrollo la realiza en cocones dentro de las partes fibrosas de la planta, principalmente en la base de las pencas, aunque también en el suelo cerca del tallo, tiene una longitud de 20 a 25 mm, con una duración de 12 a 14 días en promedio. Al principio es de color blanca, después va adquiriendo una coloración amarilla y posteriormente se torna oscura, los paquetes alares, patas y pico “rostrum” se pueden ver a los lados del cuerpo y a simple vista es fácil de identificar (Terán-Vargas y Azuara-Domínguez, 2013).

2.3.6.4. Adulto

El adulto se desprende de la exuvia pupal y permanece dentro del cocón por un periodo promedio de 11 días, es de color negro brillante (Figura 13), en algunas ocasiones rojizo y puede medir de 9 a 19 mm de longitud, sin escamas o setas, las antenas están insertadas en la base del pico o rostrum, el funículo antenal es de seis artejos (segmentos). El mazo antenal es compacto con la parte apical esponjosa y retraída, cóncava y no visible lateralmente. Los élitros tienen 10 estrías claramente marcadas y punteadas, las patas protorácicas son ligeramente más largas que las meso y metatorácicas, los machos son más robustos que las hembras y presentan el pico ligeramente más largo, éstos tienen una hilera doble de setas tibiales, más largas y más densas que las hembras. El abdomen está compuesto de 10 segmentos, aunque ventralmente solo se observan cinco segmentos (esternitos) y dorsalmente solo ocho (terguitos), el resto de los segmentos se encuentra plegados dentro del cuerpo y modificados en los órganos de reproducción (genitalia) (Booth *et al.*, 1990; Ramírez-Choza, 1993; González-Hernández *et al.*, 2010).

2.4. Dimorfismo sexual

Para diferenciar de una forma correcta el sexo del picudo del agave entre machos y hembras, existe una característica morfológica en el último segmento abdominal viéndolo ventralmente, se menciona que en las hembras es puntiagudo y más angosto, y en los machos es romo y más amplio. En el macho la abertura de la genitalia es en forma de media luna para la salida del edeago y en la hembra la abertura es una ranura para la recepción del edeago (Figura 13) (Siller, 1985; González-Hernández *et al.*, 2010).

2.5. Ciclo biológico

Con base a los trabajos realizados sobre el ciclo biológico, los resultados indican una variabilidad en tiempos de desarrollo, debido principalmente a que estos trabajos se han realizado en diferentes especies de agaves, las cuales pueden tener efecto en la concentración de nutrimentos para el desarrollo de *Scyphophorus acupunctatus* o la variabilidad de las condiciones climáticas en donde se realizan los experimentos. Por

ejemplo, Siller (1985) reporta que la duración del ciclo biológico de *S. acupunctatus* desde huevo hasta adulto fue de 81 días; con un periodo de incubación del huevo de ocho días, la duración del estado larvario fue de 58 días y un periodo de pupación de 13 días, en condiciones de laboratorio. Valdés-Estrada *et al.*, (2010) determinaron el ciclo biológico en laboratorio donde encontraron que la incubación de los huevos fue de seis días en promedio y determinaron seis estadios larvales con una duración de 35 días, mientras que la longevidad del adulto fue de 414 días en promedio. En Oaxaca Aquino *et al.*, (2010) reportaron el ciclo biológico de *S. acupunctatus* en condiciones de laboratorio, con temperaturas *max* de 23 ± 2.16 °C y *mín.* de 21 ± 2 °C con %HR *máx.* de 56 ± 8.36 y *mín.* de 45 ± 8.68 %, el periodo de incubación para huevo fue 7.7 ± 1.4 días, y para larval fue de 65.2 ± 11.1 días, para pupa fue de 16.5 ± 2.8 días, con duración de 89.4 días promedio en todo el ciclo, siendo similar a lo documentado por Ramírez-Choza en 1993, donde menciona, que el ciclo del insecto, fue de 81.15 días (Cuadro 1). Por otro lado, el periodo comprendido desde emergencia de hembras hasta oviposición es de 28 días, la cual puede ovipositar cuatro huevos por mes y 32 durante toda su vida (Siller, 1985; Ramírez-Choza, 1993; Beltrán *et al.*, 2005).

Cuadro 1. Comparativo del ciclo biológico de *Scyphophorus acupunctatus* en condiciones de Laboratorio reportada por distintos autores en regiones contrastantes.

Ciclo biológico (días)				Área de estudio	Generación es por año	Condición climática		Lugar de estudio	Autor
Incubación (huevo)	Larva	Pupa	Adulto			T °C	%HR		
$\bar{x}$: 7.7 ± 1.4	$\bar{x}$: 65.2 ± 11.1	$\bar{x}$: 16.5 ± 2.8	$\bar{x}$: 186 ± 10.4	Laboratorio	1.4	Max = 23 Min = 21	Max=56% Min=45%	Oaxaca, México	Aquino <i>et al.</i> , 2010.
5.5	124	10.5	433.7	Laboratorio Dieta Manzana	---	27 ± 2	60%	Yautepec, Morelos, México	Valdés-Estrada <i>et al.</i> , 2004.
5.5	47	10.5	433.7	Laboratorio Dieta Nardo	---	27 ± 2	60%	Yautepec, Morelos, México	Valdés-Estrada <i>et al.</i> , 2004.
$\bar{x}$: 5.9 ± 0.10	$\bar{x}$: 34.9 ± 0.24	$\bar{x}$: 9.7 ± 0.08	$\bar{x}$: 413.8 ± 4.68	Laboratorio Febrero, 2000	---	27 ± 2	60%	Yautepec, Morelos, México	Valdés-Estrada <i>et al.</i> , 2010.
$\bar{x}$: 5.5 ± 0.07	$\bar{x}$: 54.2 ± 0.26	$\bar{x}$: 9.7 ± 0.07	$\bar{x}$: 433.7 ± 5.74	Laboratorio Septiembre, 2001	---	27 ± 2	60%	Yautepec, Morelos, México	Valdés-Estrada <i>et al.</i> , 2010.
8	58	12-14	133 a 137	Laboratorio Dieta tejido A. <i>salmiana</i>	---	$\bar{x}$: 27	62 a 93%	Mérida, Yucatán, México	Ramírez-Choza, 1993.
5	78	11	105	Laboratorio Dieta tejido A. <i>tequilana</i>	---	$\bar{x}$: 27	62 a 93%	Guadalajara, Jalisco, México	Beltrán <i>et al.</i> , 2005.
5	85	11	111	Laboratorio Dieta jugo de A. <i>tequilana</i>	---	$\bar{x}$: 27	62 a 93%	Guadalajara, Jalisco, México	Beltrán <i>et al.</i> , 2005.

2.6. Hábitos

En plantaciones comerciales de agave tequilero, los picudos adultos suelen encontrarse en la base de las hojas, pencas o raíces, así como al interior de las piñas, generalmente en aquellas en proceso de descomposición o que presentan alguna enfermedad. Por otro lado, en la región Valles de Jalisco, se ha observado daños severos en cogollo (Figura 5) y escapo floral, los adultos, son de hábitos crepusculares y pueden usar el interior de las piñas para copular y ovipositar sus huevecillos, estos huevecillos emergen, las larvas crecen y se desarrollan dentro de la piña, y permanecen ahí por un tiempo determinado, dependiendo de la disponibilidad de tejido apropiado para su alimentación (Ramírez-Choya 1993; González-Hernández *et al.*, 2007b). Cabe mencionar que este insecto prefiere plantas maduras o con daños por marchitez y pudrición del cogollo, pero puede atacar cualquier etapa fenológica del cultivo e inclusive hijuelos y se encuentra activo durante todo el año (Solís-Aguilar, 2001a; González-Hernández *et al.*, 2007b). Por otro lado, Lock (1962) indicó que, en Tanzania, el hábitat favorable del insecto es en plantaciones con ambientes húmedos e incide menos en lugares fríos y secos, además señaló que la migración del insecto está influenciada por la temperatura y luz, siendo estimulado por su vuelo en una temperatura óptima de 32°C y en forma general la precipitación refleja la actividad del insecto.

2.7. Métodos de control

Para mantener el control del picudo del agave en campo, se utilizan principalmente insecticidas sintéticos. Sin embargo, su efectividad no ha sido tan exitosa, debido a que el producto aplicado no llega hasta donde se encuentran las larvas, pupa y adultos que se alojan dentro de las piñas, por lo que es indispensable que los productos sean aplicados cuando el insecto adulto se encuentre expuesto en el exterior de la planta (Terán-Vargas y Azuara-Domínguez *et al.*, 2013). En la actualidad existe en el mercado una gama de productos biológicos, como por ejemplo hongos entomopatógenos (*Beauveria bassiana*, *Metarhizium anisopliae* Cepa Q04) los cuales ofrecen una alternativa viable para su control, pero también tienen desventaja por su efecto más lento y altos costos.

2.7.1. Enemigos naturales

El cultivo del agave tequilero tiene un ciclo de vida de seis a ocho años, sin embargo, durante su desarrollo es atacado por diferentes plagas y enfermedades, siendo el picudo del agave *S. acupunctatus* la principal plaga, por ende, es importante conservar los enemigos naturales nativos de cada región (Figura 6). Entre éstos se reportan los histeridae depredadores de larvas: *Placodes ebeninus* Lewis, *Hololepta yucateca*, *Hololepta cuadridentata* y algunos parasitoides como la avispa *Alienoclypeus insolitus* Shenefelt (Hymenoptera: Braconidae) que parasita las larvas en su último estadio. También se reportan hongos entomopatógenos como; *Beauveria bassiana*, *Metarhizium anisopliae*, *Verticillium* spp., y los nemátodos: *Heterorhabditis bacteriophora* y *Steinernema feltiae*, *Steinernema carpocapsea* All California, *Steinernema carpocapsea* All Florida cepas con mayor virulencia para el control de *S. acupunctatus* en adultos (Lock, 1969; Siller, 1985; Hueso *et al.*, 2006; Aquino *et al.*, 2006).

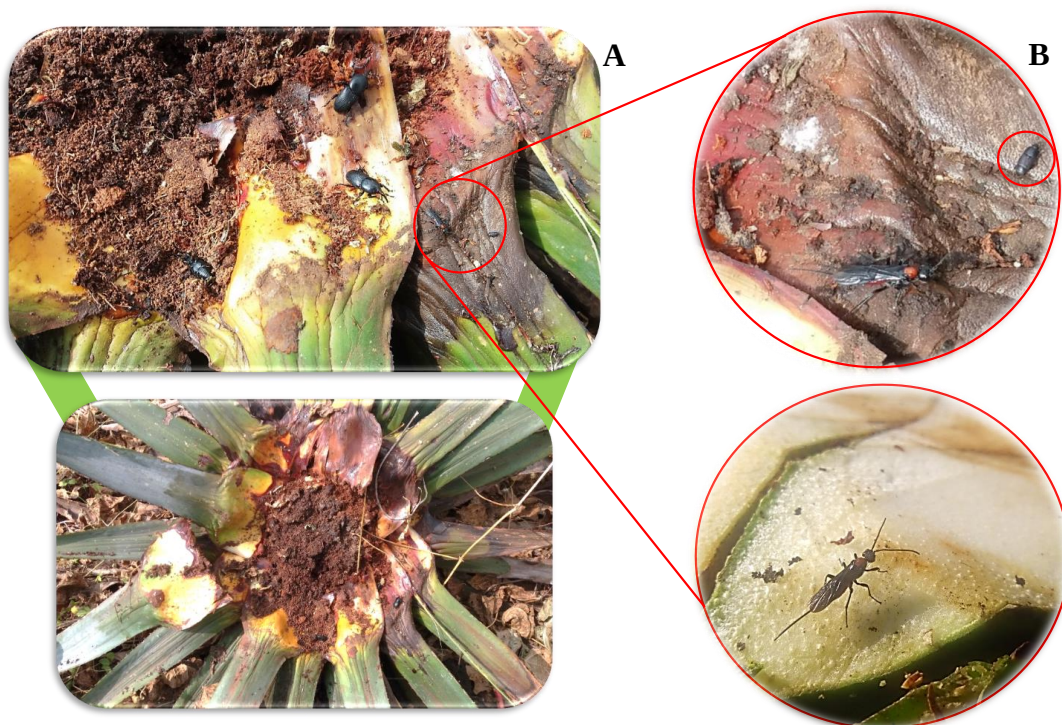


Figura 6. Adultos del picudo en planta severamente dañada y enemigos naturales. A) Picudos adultos, B) Depredador de larvas (*Hololepta* spp) y parasitoide *Alienoclypeus insolitus*. (Créditos fotográficos: Santana, 2019).

2.7.2. Cultural

Una de las estrategias más efectivas para controlar las poblaciones del picudo del agave es a través del control cultural, jima fitosanitaria o de recuperación, tales como: destrucción de plantas con síntomas avanzados de pudrición del cogollo, mancha gris y marchitez, ya que son altamente atractivas para el picudo por la cantidad de volátiles que liberan al fermentarse (Lock, 1962; Solís-Aguilar, 2001a). Eliminación de malezas y plantas voluntarias, las cuales pueden incidir como focos de infestación, así también como la realización de muestreos/monitoreos continuos para la detección oportuna de adultos e implementar medidas de control a tiempo y utilizar material propagativo sano (CESAVEG, 2008; SENASICA, 2011).

2.7.3. Químico

El picudo del agave es un insecto de hábitos crípticos que se interna en la piña, donde cumple todos sus estadios de desarrollo, por lo cual, su control con insecticidas sintéticos es difícil, debido a que los productos aplicados de contacto o sistémicos pueden no llegar hasta donde se encuentra el insecto, además, la planta contiene capas cerosas que complican la entrada del producto aplicado (Pérez, 1980). Sin embargo, Solís-Aguilar *et al.*, (2001b) evaluaron diferentes experimentos con insecticidas para observar su efectividad, tanto en larvas como en adultos, siendo el forato (Thimet 15 G) el mejor tratamiento contra larvas del picudo con un 100% de efectividad, mientras que el azinfos metílico (Gusación M-20) y el paratión metílico (Folidol M-50) mostraron ser los mejores tratamientos contra insectos adultos con un 97% y 95% de efectividad, respectivamente. Por otra parte, los insecticidas como el paratión etílico (50%) L.E; diazinón (25%) L.E; y Lorsban 480 L.E. en dosis de 1,2 y 1 cc por litro de agua, controlan eficazmente a *S. acupunctatus* en henequén en Yucatán (Ramírez-Choza, 1993). Aunado a esta investigación González-Díaz (2002) determinó que los mejores tratamientos con insecticidas contra adultos del picudo del agave tequilero fueron el azinfos metílico, metomilo, endosulfan y carbofuran, mientras que para larvas fueron azinfos metílico, carbofuran, metomilo y lambda cyhalotrina, teniendo como resultados excelente control de esta plaga.

2.7.4. Etológico

Es una herramienta que se utiliza para monitorear y/o controlar insectos adultos de algún cultivo de importancia económica a través de feromonas de agregación, este método permite establecer estrategias de control, basadas en planeamientos. Dentro de este método se encuentra el uso de trampas con feromona de agregación y cebo alimenticio (impregnado con insecticida) como en el caso del monitoreo picudo del agave, así como alomonas y volátiles asociados a la planta (Rojas *et al.*, 2006; Ruiz-Montiel *et al.*, 2008). Por ejemplo, en plantaciones de agave azul tequilero en la región Valles de Jalisco, Figueroa-Castro *et al.*, (2009) utilizaron trampas cebadas con feromona de agregación sintética (2-metil-4-octanona + 2-metil-4-octanol) y tejido de agave para capturar insectos y conocer la fluctuación poblacional, actualmente el Comité Estatal de Sanidad Vegetal de Jalisco (CESAVEJAL) utiliza este mismo sistema de trampeo para monitorear esta misma plaga en la zona Denominación de Origen del Tequila.

2.8. Monitoreo epidemiológico

2.8.1. Dinámicas poblacionales

Los factores responsables del crecimiento o decremento poblacional, puede depender de su densidad (el número de individuos por área, por volumen, o por unidad habitable) o ser independientes de ella. Entre los independientes (los que manifiestan su efecto en la población) está el clima y el tiempo (temperatura, humedad, luminosidad, pluviosidad, granizo, sequia, y demás factores abióticos de control natural), los ciclos temporales y los siniestros (incendios, inundaciones, control químico de artrópodos), son factores que modifican las poblaciones de cualquier tamaño, lo mismo sucede con la migración (emigración e inmigración), el voltinismo y los periodos de quiescencia (hibernación y diapausa) que estén genéticamente programados en una especie, independientemente del tamaño de su población (Romero, 2014). Por ejemplo, Solís-Aguilar, 2001a) determinó mediante disección de plantas, la fluctuación poblacional del picudo del agave en tres plantaciones comerciales de agave tequilero en Jalisco, en los años 1999 al 2000. En una plantación perteneciente al municipio de tequila, el picudo presento picos

máximos de densidad poblacional en abril de ambos años (21.3 y 18.5 picudos adultos/planta). En el municipio de Tepatitlán de Morelos, en el año 1999, la densidad poblacional se mantuvo en aumento desde febrero hasta julio (pico máximo de 16.3 picudos adultos/planta), aunado a ello, a partir de octubre, la población se incrementó de nuevo, teniendo un pico máximo poblacional en abril del 2000 (9.6 picudos adultos/planta), en el municipio de Zapotlanejo en el año 1999 se observó la presencia de larvas en abril y mayo. Posteriormente, a partir de octubre del mismo año, se identificó un decremento en forma más definida en noviembre. Lo anterior, sugiere que, en las tres plantaciones comerciales, las poblaciones del insecto se refieren a una misma generación o generaciones sobre-puestas (González-Hernández *et al.*, 2007b).

2.8.2. Distribución espacial de poblaciones

La distribución es un conjunto de influencias: como por ejemplo búsqueda de nutrientes, condiciones físicas y climáticas favorables, reacciones de competencia por espacio o alimento, entre otras. El modelo o distribución espacial se considera como un elemento fundamental de los seres vivos y su entendimiento incide en la eficiencia de los métodos de muestreo, así como el análisis e interpretación de los datos. Existen diferentes tipos de distribución espacial, como, por ejemplo: Distribución uniforme, distribución al azar, esta se refiere a especies que tienden a reunirse en grupos, y distribución segregada, cuando los individuos se juntan en grupos densos pero separados de otros grupos también densos, esta se observa frecuentemente en plagas agrícolas (Figura 7) (Vargas y Rodríguez, 2007).



Figura 7. Ejemplo de la distribución espacial de especies. A) Distribución uniforme, B) Distribución al azar, C) Distribución agregada.

2.8.3. Modelos de predicción

Uno de los campos de la ciencia que tiene un mayor desarrollo en la actualidad es el diseño y uso de modelos matemáticos que permiten evidenciar, medir, predecir y anticipar fenómenos naturales del medio ambiente, así como estimar ciclos biológicos de insectos y enfermedades de plantas (Haro, 2016). También permiten anticipar y prever las necesidades nutricionales de cultivos agrícolas, como etapas fenológicas de desarrollo, fechas de floración y sus adaptaciones climáticas (Bouchet, 2016). Por ejemplo, Mills (1944) publicó uno de los modelos más fiables en frutales, conocido como tabla de Mills, el cual se trata de una superficie de respuesta del tiempo requerido por *Venturia inaequalis* (anamorfo *Spilocaea pomi*), agente causal de la roña del manzano, donde las unidades de severidad acumuladas indican al productor realizar aplicaciones de fungicidas. Así mismo, Hilbert y Logan (1983) describieron el modelo de Logan tipo III, cuya expresión matemática es la combinación de dos funciones, la primera para cubrir la parte ascendente de la tasa de desarrollo del insecto y la segunda para la región descendente de la misma, esto predice un aumento de la tasa de desarrollo a temperatura inferior a ese umbral. Sin embargo, Delgadillo-Alemán *et al.*, (2006) implementaron un modelo básico para el control de palomilla dorso diamante (*Plutella xylostella* L.) en el cultivo de brócoli, donde la población $x(t)$ tiene un crecimiento natural exponencial con una tasa α ; que existe migración del exterior a una tasa β constante, en un tiempo determinado $t = T$ donde indica una aplicación de insecticida, el cual tiene una efectividad proporcional al tamaño de la población. Siguiendo la misma lógica Carreño *et al.*, (2000) aplicaron un modelo llamado depredador-presa en cultivos de hortalizas (pimiento y tomate) para el control biológico de las plagas (Gusano *Helicoverpa armígera*, Mosca blanca *Bemisia tabaco*, Trips *Frankliniella occidentalis*), y los depredadores fueron; *Orius* sp y *Macrolophus caliginosus*. Por otra parte, Suris *et al.*, (2013) determinaron la competencia inter-específica entre *Heliothis virescens* y *Spodoptera frugiperda* en el cultivo de garbanzo utilizando el modelo de Lotka-Volterra, a partir de poblaciones promedio de ambas especies. El modelo Lotka-Volterra de competencia entre especies están determinadas mediante el examen de

las isóclinas $Y_2 = w_2x + K_2$ y $Y_1 = w_1x + K_1$, las cuales se obtienen cuando las poblaciones dejan de crecer.

2.8.4. Método grados-día como instrumento de predicción

Los grados-día (°D) representan la acumulación de unidades de calor por encima de una cierta temperatura, durante un periodo de un día (24h), (en el caso de los insectos, esta temperatura es el umbral mínimo de desarrollo). Por lo tanto, es necesario establecer un umbral, por ejemplo: eclosión, mudas larvarias o ninfas, pupación, emergencia del adulto (Marco, 2001). Las unidades calor, son unidades de tiempo que un organismo ha estado expuesto a temperaturas adecuadas para su desarrollo, y la fórmula para calcular UC es la siguiente: $UC = (T_{\text{máx}} + T_{\text{mín}}) / 2 - T_{\text{base}}$, donde **Tmáx** es la temperatura máxima registrada en un día determinado, **Tmín** es la temperatura mínima registrada en un día, **Tbase** es la temperatura base específica de cada especie. La estimación se realiza por día y los resultados obtenidos van sumándose diariamente (Lee, 2011; Garay, 2015; Westhoven, 2016). Existen diferentes métodos para calcular los grados-días, los principales son el método del Seno Simple, Doble Seno, Triángulo Simple y Doble triángulo. Por ejemplo, The University of California Agriculture & Natural Resources (2014) utilizó el método del Seno simple para el cultivo de algodón con un umbral máximo de 30°C y un mínimo de 12.7°C. Por otra parte, Peña-Martínez *et al.*, (2018) determinaron las unidades calor para el pulgón amarillo del sorgo *Melanaphis sacchari* (Zehntner, 1897), utilizando cámaras de cría (incubadora), y observaron el desarrollo de hembras vivíparas ápteras (estadios N1 a N4), y las mantuvieron a temperaturas constantes de: 5, 10, 15, 20, 25, 30 y 35°C a 60 ± 10% de humedad relativa (HR) con un fotoperiodo de 12/12.

También, Quiñones-Pando (1997) estimó pronósticos de poblaciones del picudo del algodonnaro (*Anthonomus grandis* Boheman) con base a unidades calor, estimando un total de 330 unidades calor desde huevecillo a adulto (ciclo completo), utilizando la siguiente formula: sean, UC= grados día acumulados en un día (°C), Tx= Temperatura media del día (°C), Tbase= Temperatura base (°C).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Criterios de selección del área de estudio

Para la selección de sitios de monitoreo del picudo del agave, en diciembre 2017 y enero 2018, se realizaron recorridos de campo en las regiones de Los Altos, Valles y Sur en el estado de Jalisco, con la finalidad de caracterizar zonas de producción con mayor superficie sembrada para instalar una red de monitoreo regional. Aunado a esta actividad se realizaron análisis temporales y espaciales de ocurrencia de focos de infestación de plagas y enfermedades del agave, con datos generados durante 2012-2015 por la Campaña Contra Plagas Reglamentadas del Agave a los cuales se integraron datos de superficie cultivada de *Agave tequilana* (SIAP, 2015), clima (CONAGUA, 2015) y factores edáficos (INEGI, 2015).

Posteriormente, se empleó la metodología **REG-N** (Acevedo-Sánchez *et al.*, 2016) en la matriz de datos para determinar áreas ponderadas de inductividad epidémica poblacional de plagas del agave (Figura 8) para coadyuvar a definir la superficie y número de sitios con criterios epidémicos a nivel regional (Cuadro 2).

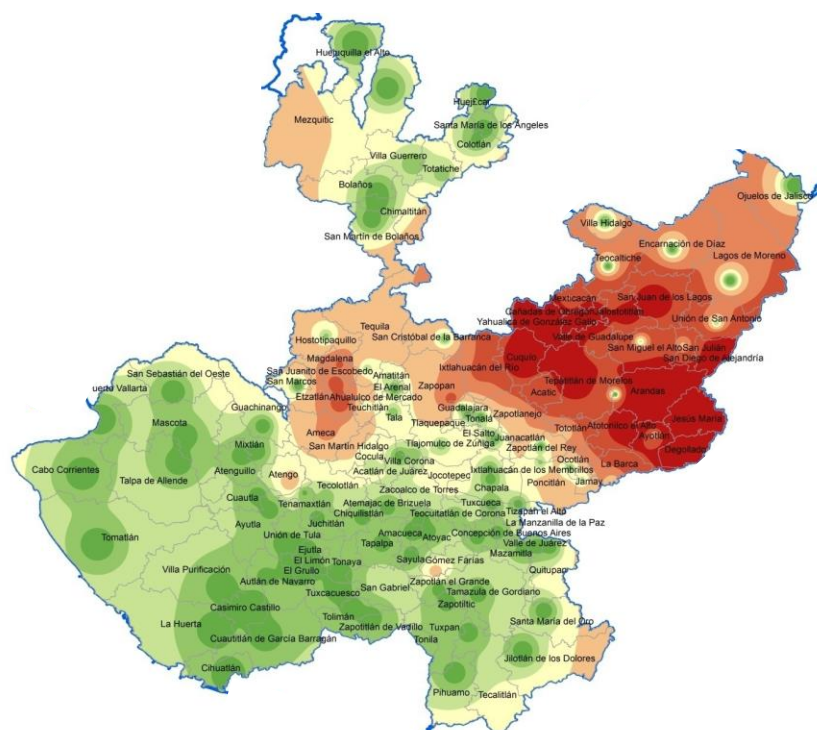


Figura 8. Mapa espacial regional de inductividad epidémica de plagas asociadas al cultivo de *Agave tequilana* en Jalisco (CP-LANREF, 2018), donde el color rojo representa alta intensidad de insectos y enfermedades, el verde menos intensidad.

3.2. Establecimiento de una red de trampeo regional

Una vez identificada la región Los Altos y determinada la cantidad de predios, en enero 2018, se estableció una red para el monitoreo y trampeo del picudo del agave, la cual estuvo integrada por 20 parcelas comerciales de productores particulares y empresas tequileras (Herradura, Cuervo, Sauza, Don Julio, Espolón y Tapatío). Para la selección de estos predios, se consideraron criterios diferenciados de manejo tecnológico, edafo-climático y agronómico, con el fin de captar la mayor variabilidad *intra* e *inter* regional de la dinámica poblacional del insecto (Cuadro 2). Con el objetivo de desarrollar modelos de alertas y *pre*-alertas tempranas de manejo, basados en condiciones epidemiológicas y climáticas, los cuales permitirán eficiencia en el análisis y la toma de decisiones oportunas para el manejo preventivo del picudo del agave. Las trampas se distribuyeron en la región Los Altos (Figura 9 y Cuadro 3), estratégicamente por criterios de inductividad regional y logística operativa (accesibilidad) con base a los recorridos de campo. La distancia de una plantación a otra fue variable, aunque mínimamente se estableció un umbral de 2.5km.

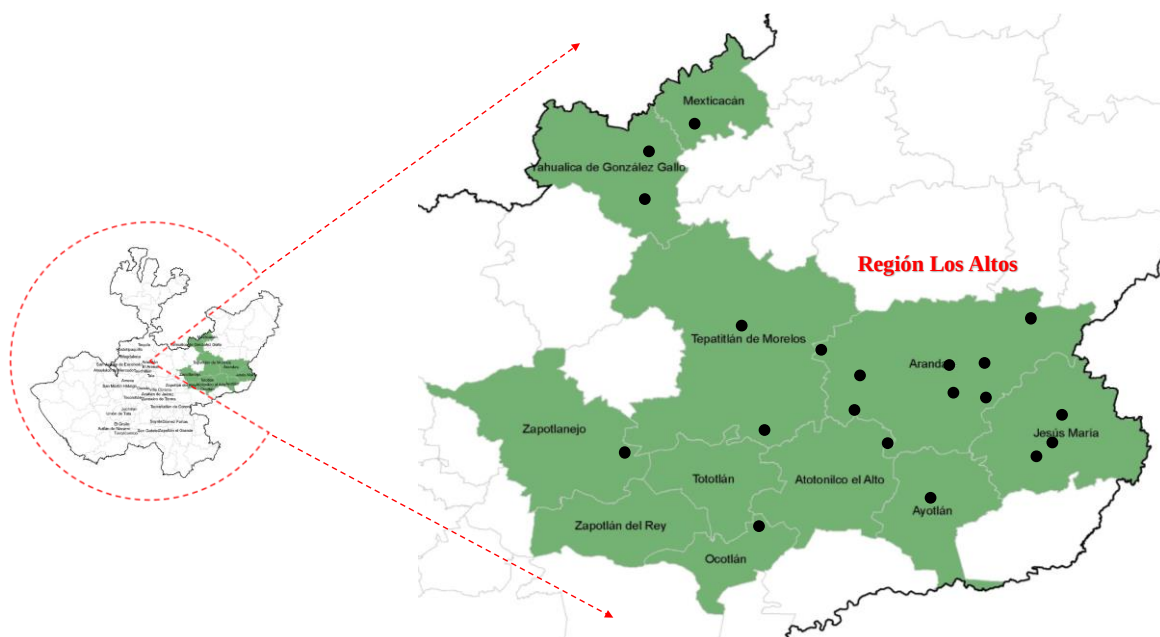


Figura 9. Mapa espacial con municipios y ubicación de trampas, desarrollado con datos del REG-N, en la región Los Altos de Jalisco (CP-LANREF, 2020).

Cuadro 2. Criterios considerados para la selección de parcelas de trampeo-monitoreo del picudo del agave *S. acupunctatus*.

Variables de selección	Descripción
Edad plantación	Las plantaciones seleccionadas estuvieron en el rango de 2-4 años para evitar la pérdida de datos por jima.
Daño	Selección de plantaciones con daños variables en piña y cogollo y plantaciones aparentemente sanas.
Condición del terreno	Condiciones topológicas del predio, plano, ladera, lomerío.
Facilidad de ingreso	Se aseguró el acceso quincenal a la parcela. (parcelas cercadas y cerradas con candado, así como sitios de difícil acceso)
Concientización del productor	Que el productor ceda el permiso de realizar los experimentos en sus plantaciones y de la seguridad de que los equipos instalados no se extravíen o sean vandalizados.
Densidad de plantación	Cantidad de plantas por hectárea
Trampas	Verificación de trampas instaladas por parte del productor o Campaña Contra Plagas Reglamentadas del Agave.
Fertilización/nutrición	Frecuencia de fertilización, y método de aplicación utilizado
Control de malezas	Se realiza control de malezas, método: químico, físico, mecánico.
Sanidad general	Alto, medio o bajo
Tipo de vegetación	Qué tipo de vegetación hay a los alrededores del predio.
Plantaciones vecinas	Plantación representativa del área de selección
Jimas	Qué porcentaje de plantaciones jimadas hay a los alrededores del sitio del experimento.

Cuadro 3. Número y localización geográfica de los 20 sitios/parcelas comerciales de agave en investigación, para el monitoreo continuo del picudo en la región de Los Altos, Jalisco.

Región	Municipio	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)	ID Trampa	Edad	Manejo
Los Altos	Arandas	20.69531	-102.25443	2200	A-ARA-CP01	3	Alto
		20.85071	-102.15905	1959	A-ARA-CP04	3	Medio
		20.76175	-102.29359	2254	A-ARA-CP05	3	Medio
		20.73833	-102.35159	2126	A-ARA-CP06	3	Alto
		20.69574	-102.32415	2103	A-ARA-CP20	4	Medio
	Jesús María	20.61574	-102.13684	2179	A-JM-CP02	3	Alto
		20.66892	-102.09838	2308	A-JM-CP03	3	Alto
		20.59305	-102.15824	2181	A-JM-CP19	3	Alto
	San Ignacio	20.73670	-102.48599	2044	A-SICG-CP07	3	Alto
	Cerro Gordo	20.68590	-102.50458	1989	A-SICG-CP15	3	Medio
	Tepatitlán de Morelos	20.78911	-102.55293	2103	A-TEP-CP08	4	Bajo
		20.87111	-102.68562	1961	A-TEP-CP09	3	Bajo
		20.65980	-102.64447	1892	A-TEP-CP14	3	Medio
	Ayotlán	20.54438	-102.36425	1628	A-AYO-CP13	3	Medio
	Atotonilco el Alto	20.63399	-102.43847	1960	A-ATO-CP12	3	Medio
	Ocotlán	20.42459	-102.75706	1550	A-OCO-CP11	4	Medio
	Zapotlanejo	20.57257	-102.89220	1860	A-ZAP-CP10	3	Bajo
	Mexicacán	21.21134	-102.78413	1798	A-MEX-CP16	3	Medio
	Yahualica de González Gallo	21.07496	-102.88050	1872	A-YAH-CP17	3	Medio
		21.16743	-102.87270	1845	A-YAH-CP18	3	Medio

3.2.1. Descripción y preparación/instalación de trampas

Para el trampeo del picudo del agave, se utilizaron trampas fabricadas manualmente bajo una modificación del diseño de Rangel-Reyes (2007). Estas consistieron en cubetas de plástico color blanco con capacidad de 4L, con un diámetro de 20 cm y 18.5 cm de altura, con cinco perforaciones laterales en forma circular de 4 cm de diámetro y 1 cm de separación de la base de la cubeta, estos círculos funcionan como puertas de entrada de los picudos. En el centro de la tapa de la cubeta (Figura 10) se colocó un gancho de alambre, donde se colgó la feromona de agregación (Tequilur® 350 mg 2-metil-4-octanona, dichos liberadores fueron proporcionados por FeroComps México, D. F.) a través de la gestión del Dr. Héctor González Hernández, perteneciente al área de investigación científica del COLEGIO DE POSTGRADUADOS. Para preparar la trampa, en una cubeta se colocó una bolsa de polipapel con 350 g de trozos de piña de agave como cebo alimenticio, los cuales

fueron impregnados con aproximadamente 50 ml de insecticida (Malathion 1000 a una concentración de 10 ml/L de agua) con un aspersor manual, en la bolsa se realizaron seis perforaciones para permitir la entrada del insecto, una vez preparado el cebo se tapó la cubeta (Figura 10). Las trampas se colocaron al ras del suelo, a un costado de la planta, siguiendo la línea de plantación del surco central del predio. Así mismo, se verificó que no hubiese otra trampa instalada por parte del productor o empresa en un radio de 100 m, esto para evitar sesgos en la captura del insecto por interferencia de feromonas.

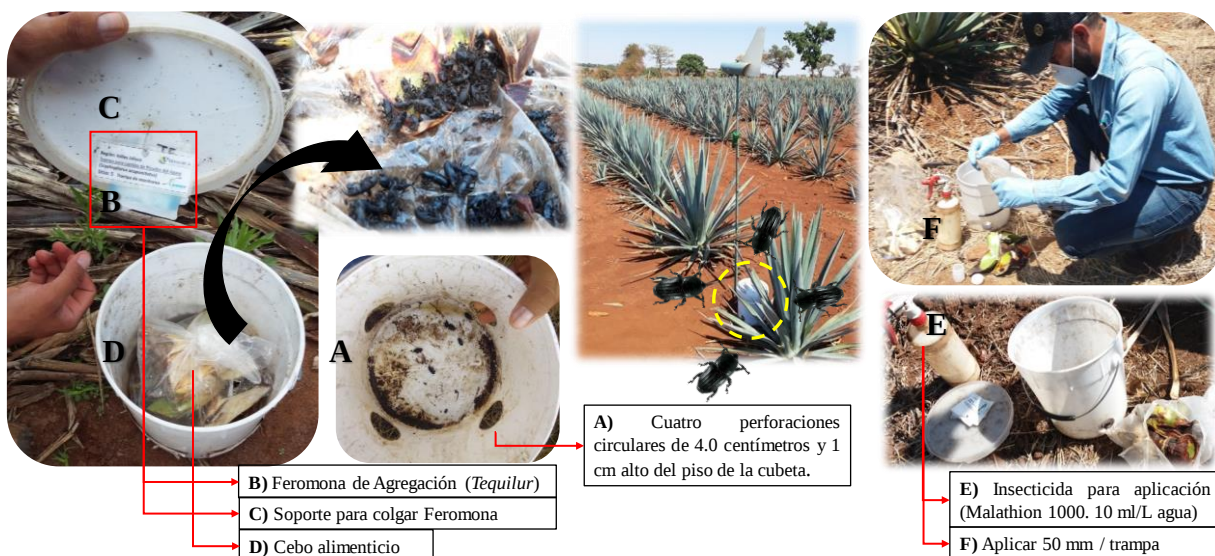


Figura 10. Procedimiento para la instalación de trampas para captura de picudos. A) Cubeta con cuatro perforaciones circulares, B) Sobre con feromona sintética de agregación, C) Tapadera con soporte de alambre recocido para colgar la feromona, D) Trozos de tejido vegetal de la piña “cebo” dentro de una bolsa de plástico, E) Aspersor manual con insecticida “Malathion 1000” al 10% y F) Aplicación de insecticida 50 ml/trampa (CP-LANREF, 2019).

3.2.2. Establecimiento de sensores climáticos *in situ*

En cada parcela/sitio comercial (20) se instaló un Datalogger HOBO® Pro v2 para la medición de temperatura (°C) y humedad relativa (%HR) del ambiente. El sensor se programó a intervalos de registros de 30 minutos, con el fin de tener la relación directa del comportamiento climático con la fluctuación poblacional del picudo, esta actividad consistió en la colocación de una varilla de metal a 10 cm de separación de la trampa para captura de picudos, el datalogger se colocó a la altura de las plantas

de agave para extraer datos reales en relación al insecto, posteriormente se sujetó con un alambre recocido, permitiendo la entrada del extractor de datos (Figura 11). En la misma varilla de metal, también se colocó una lámina de plástico, en la cual se menciona el título del proyecto y el propósito de su instalación, esto con el fin de evitar pérdidas de los sensores climáticos por vandalismo.

La descarga de datos climáticos, se realizó a la par con los monitoreos quincenales de picudos, haciendo eficientes los recorridos de campo, los datos climáticos se integraron a una base de datos histórica en MS-Excel para los análisis correspondientes a la investigación.



Figura 11. Establecimiento del sensor climático. A) Equipo completo de monitoreo, trampa, sensor, varilla de metal y etiqueta, B) Datalogger HOBO, C) Extractor y modo de extracción de los datos climáticos, D) Ejemplo de una gráfica del comportamiento climático por predio en www.sivea.org.mx y E) Etiqueta con información de la trampa (CP-LANREF, 2019).

3.2.3. Revisión y mantenimiento de trampas

El monitoreo de picudos y cambio de cebo alimenticio se realizó a intervalos de 15 días, esta actividad consistió en el cambio de bolsa y cebo alimenticio, aplicación de insecticida, conteo de insectos capturados y descarga de datos climáticos. Por su parte, el cambio del liberador feromonal (Tequilur®) fue cada 45 días (cada tres quincenas). Los conteos de picudos capturados, se registraron en la aplicación móvil

App-SIVEA v1.1, generada por el grupo CP-LANREF (Guzmán-Hernández *et al.*, 2017). Esta *App* móvil, permitió visualizar el historial de la fluctuación poblacional del insecto en gráficas por trampa en tiempo real (Figura 12), lo que facilitó un diagnóstico rápido al productor. Posteriormente los conteos fueron enviados por vía Wifi a la plataforma SIVEA (www.sivea.org.mx) donde se integraron automáticamente para la generación de gráficos regionales y visualización de la dinámica poblacional de la plaga a través de algoritmos de programación que facilitaron la gestión de datos y su análisis epidemiológico.

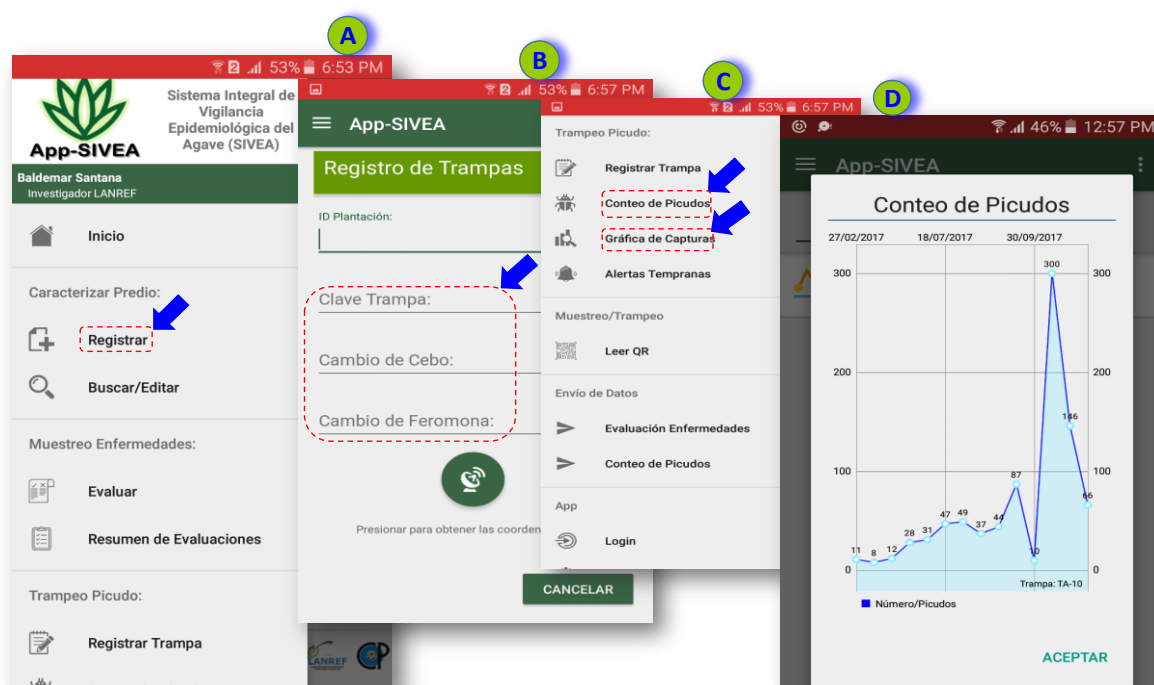


Figura 12. Vistas de App-SIVEA implementada como soporte al sistema de monitoreo del picudo del agave. A) Inicio de módulos de la aplicación, B) Registro de trampas, C) Módulos de registro de conteos de picudos y vistas de gráfica, D) Gráfica de una trampa de picudos (CP-LANREF, 2019).

3.3. Sexado de picudos colectados

Durante los recorridos quincenales, se colectaron 4437 insectos en 2018, los cuales se conservaron en frascos de plástico con capacidad de 50 ml, se agregó etanol al 70% y se etiquetaron con los siguientes datos; ID trampa, fecha de colecta, número

de picudos, región y número de colecta, con el propósito de mantener la trazabilidad de la información de cada trampa/parcela. Los insectos fueron trasladados al Laboratorio de Entomología del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Texcoco, Estado de México, donde se utilizó un microscopio estereoscópico para la revisión morfológica. Esto con el objetivo de determinar el sexo de los insectos, se observó ventralmente la forma del último segmento abdominal (Ramírez-Choza 1993), el cual, en las hembras es angosto y puntiagudo, mientras que en el macho es truncado y rombo (Figura 13). La abertura de la genitalia en el macho es en forma de media luna; mientras que en la hembra es en forma de ranura para la recepción del edeago (Siller, 1985; Ramírez, 1993).

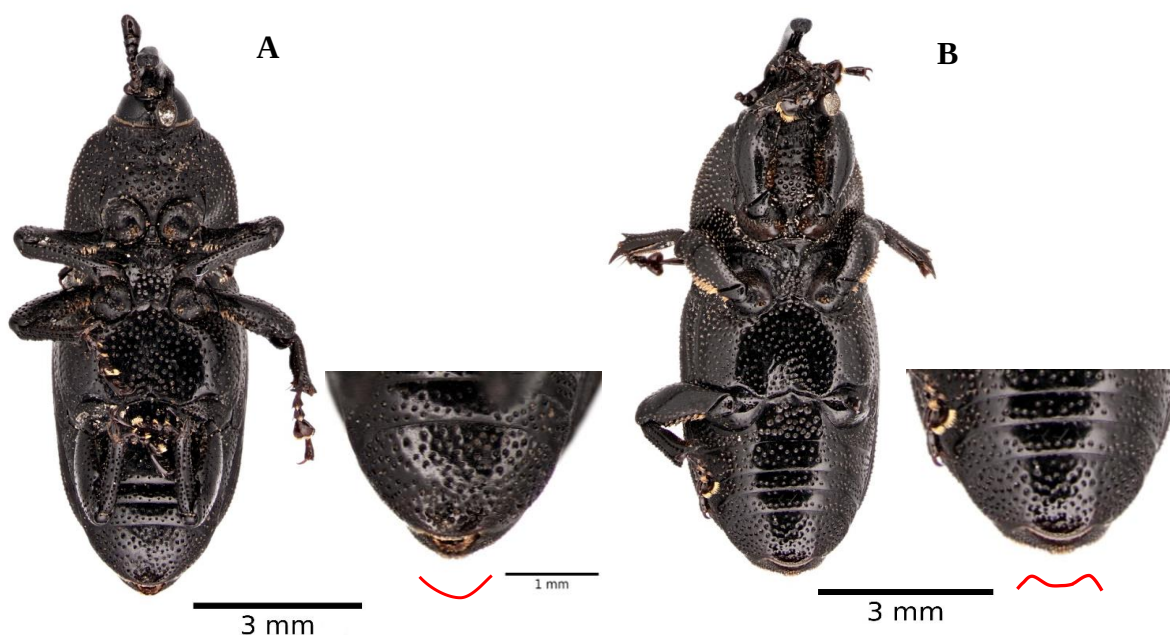


Figura 13. Caracterización morfológica de machos y hembras de *S. acupunctatus*. A) vista ventral de la hembra, último segmento abdominal terminado en punta o en forma de “U” curvatura definida, B) Vista ventral del macho, último segmento abdominal ensanchado o en forma de “M” esta puede ser ligera o bien marcada. (Créditos: Valdéz-Carrasco y González-Hernández, 2019).

3.4. Generación de bases de datos

De enero 2018 a diciembre 2019 se recabaron datos quincenalmente en las 20 parcelas de monitoreo, los cuales alimentaron la matriz de análisis que incluyó

número de picudos capturados por trampa/fecha, manteniendo un historial de dos años interrumpidos. Con un total de 48 colectas distribuidas en la región de Los Altos. Así mismo, esta base de datos integró un total de 10,671,360 registros de variables climáticas y demás para generar análisis (Cuadro 3).

3.4.1. Estimación de Horas favorables (*Hrs-fav*)

Para la estimación de horas favorables del periodo de oviposición e incubación (Y_f) de huevo de *S. acupunctatus*, se analizó el ciclo biológico indicado por Aquino *et al.*, (2010) y Santana *et al.*, 2020 con el objetivo de estimar y predecir periodos favorables para el inicio de un pico poblacional o foco de infección de la plaga, con base a temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y humedad relativa (HR) en condiciones de campo. Se utilizó la metodología de *CALCULAF v1.0* indicada por Santana-Peñaloza *et al.*, (2015). Los cálculos se realizaron empleando la base de datos climática obtenidas de cada parcela de monitoreo. Así mismo se asignaron valores a parámetros climáticos como: periodos inductivos (P_{in}) y rangos de temperatura y humedad relativa por evento biológico de *S. acupunctatus*. Además, con base al porcentaje potencial de horas favorables para la incubación del huevo, se estimó la carga de plaga en cada región.

3.4.2. Análisis de inductividad climática

Empleando los datos climáticos de las 20 trampas de monitoreo plaga-clima, se analizaron las condiciones de inductividad climática para la región, considerando el efecto de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y humedad relativa (%HR) asociada a los valores de promedios, máximos, mínimos y acumulados empleando MS-Excel 2016; ArcGIS para el mapeo espacial e identificación de focos de infestación de carga de plaga por región, así como áreas con mayor inductividad climática favorable para reproducción del picudo; y SAS para la generación de modelos a nivel región. La dinámica de infestación se relacionó con la inductividad climática, la cual integró los modelos de accionabilidad para las alertas por condiciones climáticas inductivas, para predecir picos poblacionales en la región a través del tiempo.

3.4.3. Variables evaluadas

La variable de plaga para los análisis (Cuadro 4) fue representada por el número de picudos (p) contabilizados en el monitoreo. A partir del total de insectos capturados, se calculó la mediana como valor promedio ($\bar{x}$) con el fin de identificar y entender la fluctuación poblacional del insecto, el número máximo de insectos como criterio para estimar el periodo de inductividad más alto en los periodos regionales y la suma total de picudos ($\sum p$) como el indicador de carga de plaga regional. Por lo tanto, analizando estos valores se identificaron ventanas de ocurrencia regional-estacional. Se integró la relación varianza-media, por año, semana y región, analizando la relación del promedio de insectos con respecto a su varianza regional (*Desv. Est.*).

Cuadro 4. Variables consideradas en el análisis de datos

Trampa	Elementos climáticos	Horas favorables
Suma de picudos totales ($\sum p$)	Temperatura (°C)	Horas favorables mínimas
Valor inicial: y_o	Humedad relativa (%)	Horas favorables máximas
Valor máximo: y_{max}	Promedio (°C)	Suma total de horas favorables
Valor final: y_f	Promedio (%HR)	Suma de horas favorables mínimas
Promedio ($\bar{p}$) de picudos	Mínimos (°C - %HR)	Suma de horas favorables máximas
Máximo (p) de picudos	Máximos (°C - %HR)	Horas favorables por ventana

3.4.4. Análisis temporal y parametrización

Se analizaron curvas temporales y regionales en la dinámica de infestación del picudo del agave, desde enero 2018 hasta diciembre 2019. Los análisis se parametrizaron para identificar (y_o) (nivel de infestación inicial), (y_{max}) (nivel de infestación más alto) y (y_f) (nivel de infestación al final del ciclo epidémico) en el contexto de dinámica de picudos con respecto al ciclo productivo de las plantaciones de agave.

3.4.5. Modelos de pronóstico multivariable

Las variables de la plaga, clima y horas favorables se ajustaron a modelos de regresión múltiple $\hat{y}_i = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_{i1} + \hat{\beta}_2 x_{i2} + \dots + \hat{\beta}_p x_{ip}$, donde $\hat{y}_i$ representa el estimador de infestación regional de picudos, $\hat{\beta}_0$ = parámetro de ordenada al origen,

$\hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2, \dots, \hat{\beta}_p$ son los parámetros estimados o coeficientes de regresión asociados a cada una de las variables explicatorias de clima. Estos modelos de regresión lineal múltiple permitieron pronosticar eventos (focos) del picudo del agave a distintos niveles (Y_o , Y_{max} , y Y_f) incluyendo todas las variables climáticas de temperatura y humedad relativa (min, máx. promedios y totales regionales).

4. RESULTADOS

4.1. Análisis temporal de la dinámica poblacional regional del picudo del agave azul *Scyphophorus acupunctatus*

El monitoreo durante la fase experimental 2018 - 2019 permitió identificar dos ciclos poblacionales de diferente intensidad en cuanto al promedio de picudos por trampa, con tendencia a la baja en el ciclo dos (Figura 14). El *primer ciclo* inició en marzo 2018 y terminó en marzo 2019, en el cual, el promedio de insectos por trampa (*ipt*) fue constante. Con intensidad inicial (Y_o) de 1.5 – 4.9 p *ipt* hasta junio, (ventana de secas), posteriormente a partir de julio, inició un incremento poblacional continuo, alcanzando máxima intensidad (Y_{max}) en octubre y noviembre (periodo pos-lluvias), con promedio de 19 – 24 *ipt*, periodo donde prevalece la emergencia de insectos adultos y movilidad hacia nuevos hospederos. A partir de diciembre – marzo se observó un decremento, indicando la finalización del primer ciclo poblacional (Y_f) con carga de plaga de 7 – 2 insectos por trampa. El *segundo ciclo* se presentó de marzo a noviembre 2019, el cual fue de menor intensidad con respecto al primero. La carga de plaga inicial fue de 2 - 5 *ipt* de marzo a mayo, llegando a un Y_{max} de 11 – 14 *ipt* en junio y julio, posteriormente, se presentó un decremento de agosto - noviembre con 9 – 4 *ipt*, indicando la finalización del ciclo, así como internalización de insectos adultos en nuevos hospedantes (piñas de agave) para su reproducción, incubación (oviposición/huevo/larvas/pupas) e inicio de un nuevo ciclo.

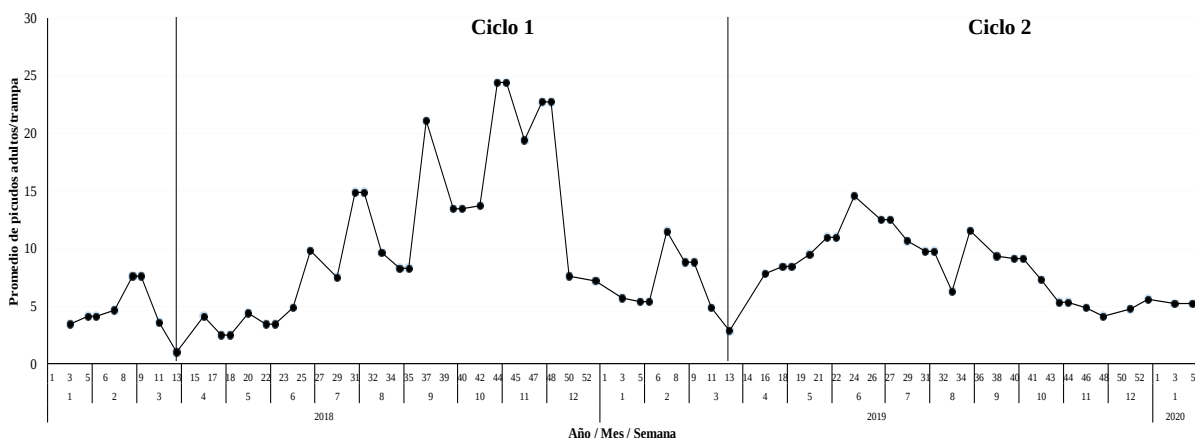


Figura 14. Promedio regional y comportamiento poblacional del picudo del agave capturados en trampas a través del tiempo en Los Altos de Jalisco.

4.2. Dinámica subregional (municipios)

La dinámica a nivel subregional, permitió identificar municipios con mayor carga de plaga durante los dos años que duró el experimento. Reportándose dos picos poblacionales (Figura 15). En 2018 (Figura 15A), los municipios más inductivos fueron; Zapotlanejo, Tepatitlán de Morelos y Ayotlán, con carga de plaga inicial Y_0 de 4 – 11 insectos por trampa entre enero y mayo, posteriormente, la intensidad poblacional incrementó, alcanzando una carga máxima Y_{max} de 19 – 57 *ipt* de agosto - octubre, sin embargo, a partir de noviembre se reportó un decremento hasta enero 2019, con Y_f de 33 – 5 *ipt* indicando la finalización del primer pico poblacional. Para el ciclo 2019, los municipios con mayor carga de plaga fueron; Zapotlanejo, Ayotlán y San Ignacio Cerro Gordo, con Y_0 de 4 – 8 insectos por trampa de enero a marzo y durante abril - mayo se presentó un incremento constante, llegando al Y_{max} de 12 – 32 *ipt* en junio - septiembre, meses en los que se reportaron lluvias constantes en la región. A partir de octubre se presentó un decremento Y_f de 19 – 2.5 *ipt* hasta enero 2020, indicando la finalización del ciclo poblacional de *S. acupunctatus*. En la Figura 15B, se presentan los municipios de; Arandas, Jesús María, Mexxicacán, Ocotlán y Yahualica de González Gallo, como los menos inductivos con promedios de 5 – 19 y 11 – 7 insectos por trampa en 2018 -2019, respectivamente, excepto Ocotlán que en 2019 presentó un pico de 35 - 80 *ipt* durante abril y mayo, intensidad poblacional ocasionado por efecto de jimas en el predio.

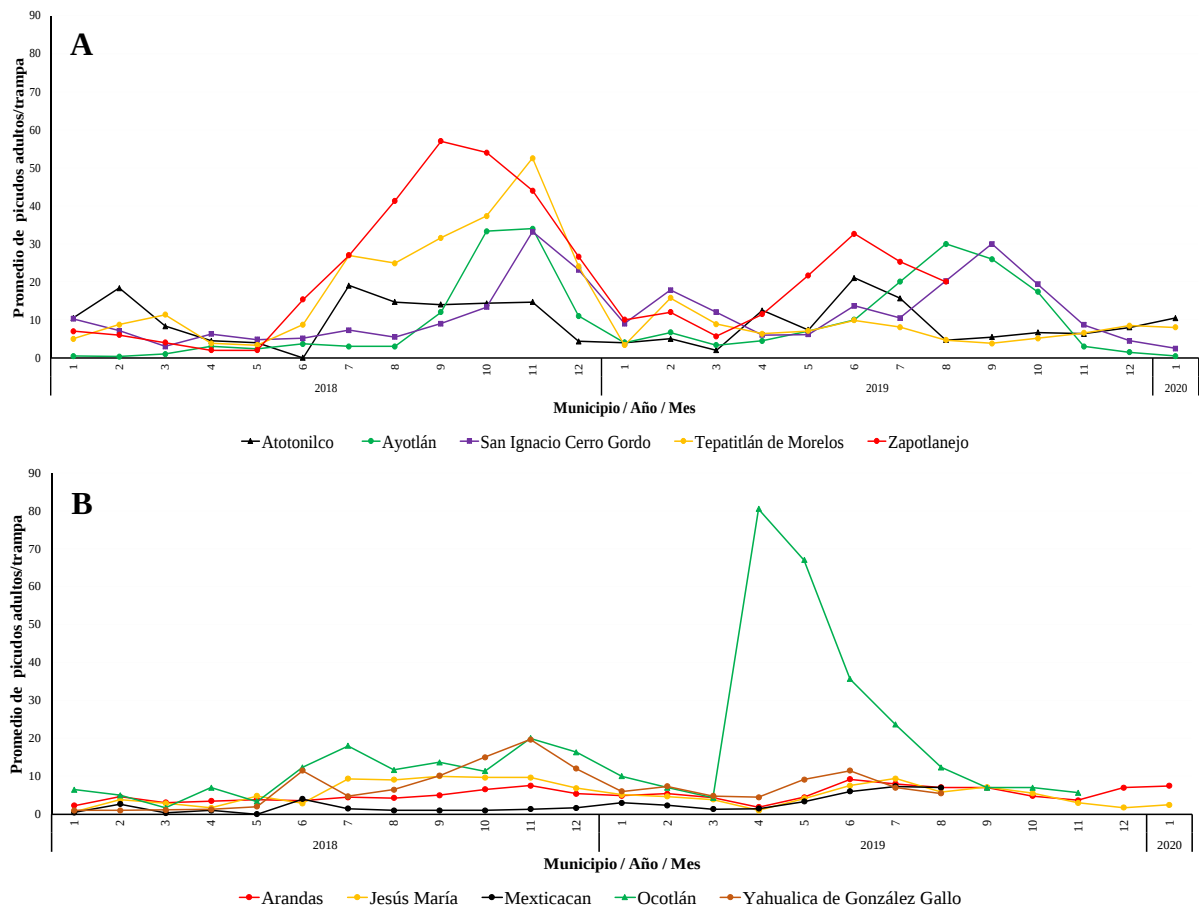


Figura 15. Comportamiento poblacional del picudo del agave a través del tiempo, en municipios de monitoreo de la región de Los Altos de Jalisco. A) Dinámica poblacional en Atotonilco, Ayotlán, San Ignacio Cerro Gordo, Tepatitlán de Morelos y Zapotlanejo. B) Dinámica poblacional en Arandas, Jesús María, Mexicacán, Yahualica de González Gallo y Ocotlán.

4.3. Dinámica a nivel local (trampa)

La dinámica poblacional a nivel de trampa reportó variabilidad del insecto, el propósito fue identificar focos específicos que puedan predecir una alerta a nivel subregional. En la Figura 16A, se presentan las trampas más inductivas y en la Figura 16B se presentan las trampas menos inductivas. Durante el ciclo 2018 las trampas; A-TEP-CP08, A-ZAP-CP10, A-SICG-CP15 y A-TEP-CP14 fueron las más inductivas, las cuales pertenecen a los municipios de; Zapotlanejo, Tepatitlán de Morelos y San Ignacio Cerro Gordo. Durante enero – mayo la intensidad poblacional Y_0 fue 3 -16 *ipt*, sin embargo, durante junio y julio se observó un incremento

constante, alcanzando un Y_{max} de 14 – 95 *ipt* durante agosto – noviembre, posteriormente de diciembre a enero 2019 se presentó Y_f con 46 – 5 *ipt* indicando la finalización del primer ciclo poblacional. Durante el ciclo 2019, la intensidad poblacional fue variable en todas las trampas, destacando A-ZAP-CP10, A-AYO-CP13 y A-SICG-CP15 como las más inductivas a nivel regional, las cuales pertenecen a los municipios de: Zapotlanejo, Ayotlán y San Ignacio Cerro Gordo, con carga de plaga promedio de 3 -32 *ipt* durante el periodo junio – septiembre, posteriormente a partir de octubre a enero 2020, la carga de plaga presentó un decremento de 19 – 3 *ipt* para todas las trampas (Figura 16A). Las trampas de la Figura 16B presentaron mayor variabilidad de capturas, destacando A-YAH-CP17, A-ARA-CP04 y A-JM-CP02 con promedio de 9 – 26 *ipt* en el periodo octubre-noviembre 2018, las cuales pertenecen a los municipios de Yahualica, Arandas y Jesús María, por otro lado, las trampas; A-ARA-CP01, A-JM-CP19 y A-ARA-CP20 fueron las más inductivas en 2019, con promedio de 7 – 21 *ipt* en el periodo mayo – agosto, ubicadas en los municipios de Arandas y Jesús María.

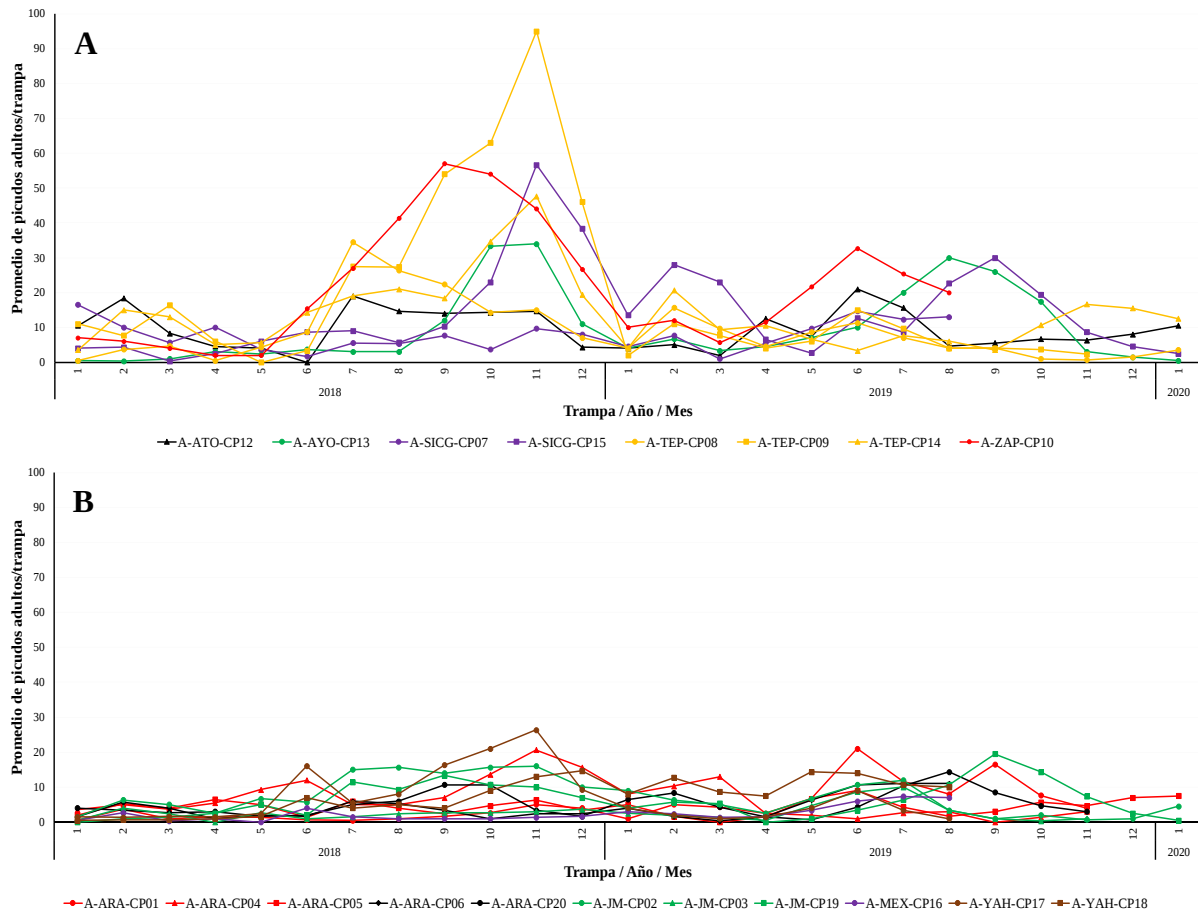


Figura 16. Dinámica local a nivel de trampas en la región Los Altos de Jalisco: A) Trampas más inductivas; A-ATO-CP12, A-AYO-CP13, A-SICG-CP07, A-SICG-CP15, A-TEP-CP08, A-TEP-CP09, A-TEP-CP14 y A-ZAP-CP10, B) Trampas menos inductivas; A-ARA-CP01, A-ARA-CP04, A-ARA-CP05, A-ARA-CP06, A-ARA-CP20, A-JM-CP02, A-JM-CP03, A-JM-CP19, A-MEX-CP16, A-YAH-CP17 y A-YAH-CP18.

4.4. Prevalencia de machos y hembras de *S. acupunctatus*

La fluctuación poblacional de ambos sexos del picudo del agave en la región Los Altos, indica una captura total de 4396 insectos de las 20 trampas, de los cuales 2611 son hembras y 1785 machos, con superioridad de 826 hembras, por lo cual, la proporción sexual fue de 1.46, sin embargo, no se encontraron diferencias significativas entre machos y hembras a través de los análisis de varianza en el periodo enero-diciembre 2018.

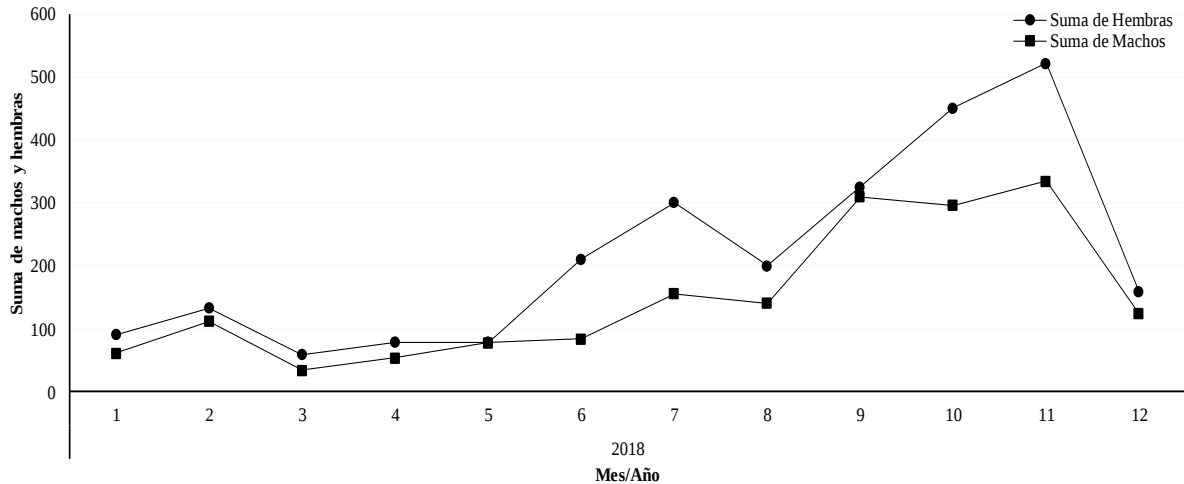


Figura 17. Suma total de machos y hembras de picudos capturados por mes, en trampas de monitoreo en la región Los Altos de Jalisco en 2018.

4.5. Análisis espacial de la dinámica poblacional y regional de *S. acupunctatus*

A nivel espacial, la proyección geo-estadística (IDW) de carga de plaga (insectos totales acumulados por trampa) en la *suma* de Y_o en el *ciclo* 2018 mostró intensidad poblacional muy baja de 5.93 – 103 insectos por trampa (*ipt*) en la región de Los Altos (Figura 18A).

En Y_{max} la fluctuación poblacional mostró un foco de baja intensidad con 27.6 - 40.6 *ipt* en Tepatitlán de Morelos, siendo este municipio el más inductivo en esta ventana. Para el resto de los municipios en la región, la intensidad se mantuvo en muy baja con 3.01 - 27.5 *ipt* (Figura 18B). En la *suma* de Y_{max} del periodo agosto – noviembre (Emergencia + copulación + movilidad), presentó mayor frecuencia en Atotonilco, Ocotlán y Zapotlán del Rey con intensidad alta de 209 – 270 *ipt*, sin embargo, en Tepatitlán de Morelos, Zapotlanejo y Tototlán se presentó un foco de muy alta intensidad con 271 – 844 picudos, con superficie de 41.44 km correspondientes a 134,875 ha, para los municipios de Arandas, Jesús María, Ayotlán, Mexxicacan y Yahualica de González Gallo, la intensidad se mantuvo en moderada con 162 – 208 *ipt* (Figura 18C).

La carga *máxima* de plaga Y_{max} en esta misma ventana, registró mayor actividad en los municipios de Tepatitlán de Morelos y Zapotlanejo, presentando dos focos de alta

a muy alta intensidad con 74 – 240 *ipt*, sin embargo, en Ayotlán y San Ignacio Cerro Gordo también se presentaron dos puntos de moderada a alta intensidad con 56 – 240 insectos; para los municipios de Atotonilco, Arandas, Jesús María, y San Ignacio, la carga de plaga se mantuvo por debajo de los 41 *ipt* (Figura 18D). En la *suma* de Y_f periodo diciembre – marzo, se reportó un foco de baja intensidad con 104 – 161 *ipt* en Tepatitlán de Morelos, municipio que se ha mantenido inductivo durante todo el periodo del estudio, para el resto de las parcelas en monitoreo, la carga de plaga se mantuvo en muy baja, con menos de 103 *ipt* (Figura 18E). Observando la carga *máxima* de plaga en Y_f , en Tepatitlán de Morelos se reportó un foco con intensidad moderada a muy alta con 42 – 270 *ipt*, abarcando un diámetro de 11.73 km correspondientes a 10,788 ha, de las cuales 679 ha de superficie, se encuentran en riesgo alto; dentro del mismo radio, se presentaron dos puntos de baja a moderada intensidad con 28 – 55 insectos, mientras que en Zapotlanejo se identificó una trampa con menos de 41 picudos. Para el resto de los municipios la intensidad se mantuvo por debajo de los 27 *ipt* (Figura 18F).

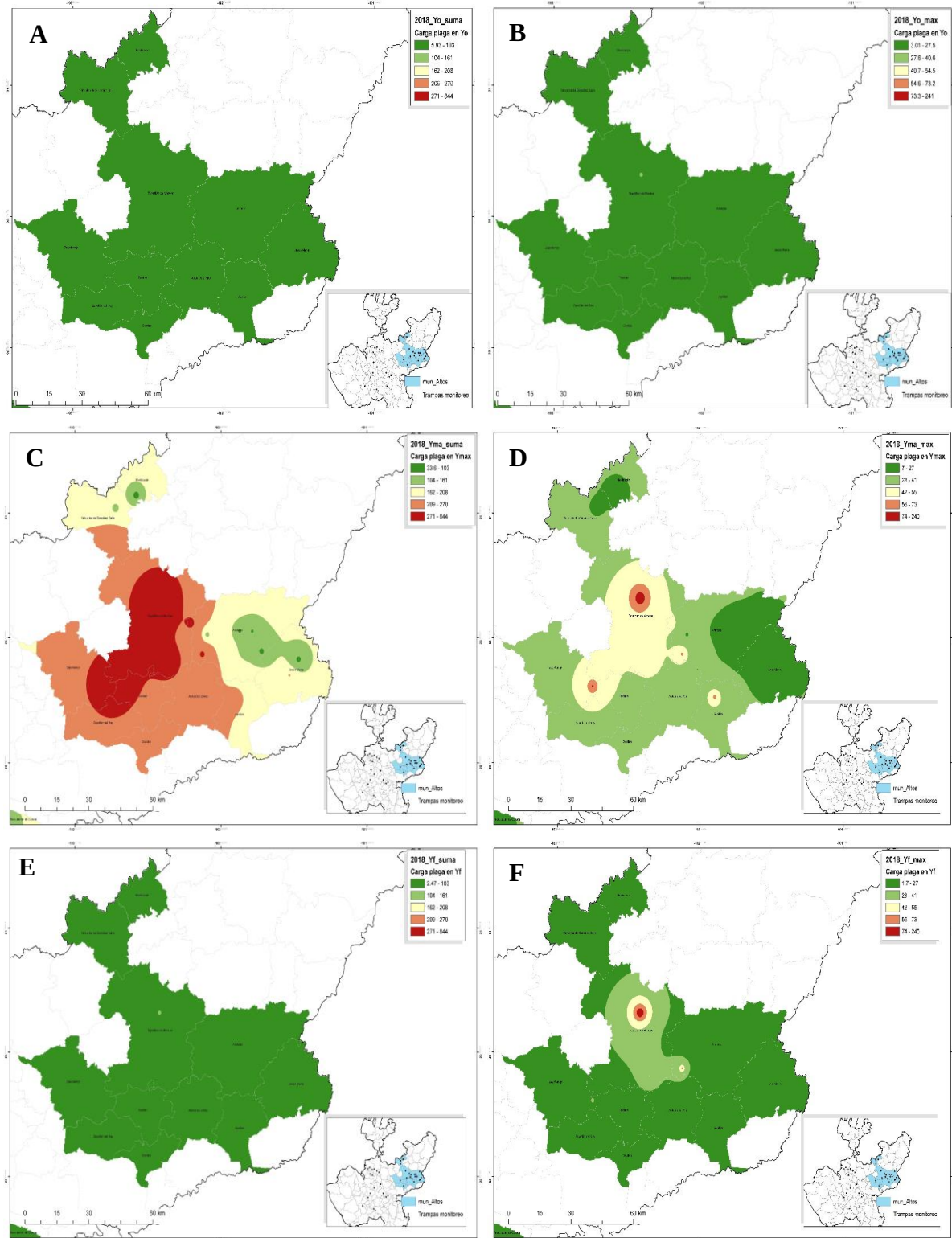


Figura 18. Proyección geo-estadística de la carga de plaga donde A, C y E son la suma total de insectos capturados; B, D y F son la máxima carga de plaga en eventos los epidemiológicos Y_o , Y_{max} y Y_f en Los Altos de Jalisco, durante el periodo 2018.

En 2019 la intensidad poblacional en *suma* total de Y_o mostró en Ocotlán un foco con baja intensidad de 6.09 – 103 *ipt*, mientras que para el resto de los municipios la carga de plaga fue muy baja con menos de 103 insectos por trampa (Figura 19A). Mientras que para la *máxima* carga de plaga Y_{max} presentó en Ocotlán el mismo foco, pero con mayor superficie, la intensidad fue de moderada a alta con 42 - 73 *ipt*, el cual abarcó un diámetro de 4.81 km correspondientes a 1810 ha. En el resto de municipios la intensidad fue muy baja con menos de 27 picudos (Figura 19B).

En la *suma* de Y_{max} periodo agosto – noviembre, la carga de plaga presentó una disminución con respecto a la misma ventana pero del ciclo 2018, reportando cuatro focos distribuidos en Zapotlanejo, Ocotlán, Ayotlán y Arandas, el foco con mayor intensidad fue de moderada a muy alta con 162 - 844 *ipt*, con diámetro de 19.83 km correspondientes a 30,853 ha, de las cuales 6055 ha, presentaron intensidad de alta a muy alta con 209 -844 *ipt*, el resto de focos presentaron intensidad de moderada a alta con 162 - 270 picudos y diámetro aproximado de 8.32 km correspondientes a 6110 ha. En Tepatitlán de Morelos, Jesús María, Atotonilco y Tototlán la carga de plaga fue baja con 104 – 161 *ipt*, mientras que para Mexicacan y Yahualica de González Gallo la intensidad fue muy baja con menos de 103 adultos (Figura 19C).

En Y_{max} la carga de plaga se presentó en Ocotlán, reportando un foco con intensidad moderada a alta de 42 - 73 *ipt*, el cual presentó un diámetro de 5.9 km correspondientes a 2734 ha, posteriormente se identificaron focos incipientes en Ayotlán, Arandas y Zapotlanejo, con menos de 41 insectos (Figura 19D).

En el periodo noviembre – marzo (internalización y oviposición) del insecto, la *suma* total en Y_f mostró carga de plaga muy baja, con menos de 103 insectos por trampa en la región (Figura 19E). Mismo comportamiento se presentó para Y_f en la *máxima* intensidad, con 27 *ipt* (Figura 19F). En general, se observó un decremento continuo de carga de plaga a través del tiempo, en 2018 la intensidad poblacional fue muy alta con respecto a 2019. Esto posiblemente explicado por productores particulares y empresas tequileras que implementaron medidas de manejo para plagas y enfermedades. Cabe mencionar que el precio de agave aumentó considerablemente, pasando de \$3 pesos/kilo en 2015 a \$13 pesos en 2016, hasta \$26-29 en 2019, cifra

que se ha incrementado (Sistema de Inversión digital agave, 2020), revelando la importancia en costos de cada planta de agave.

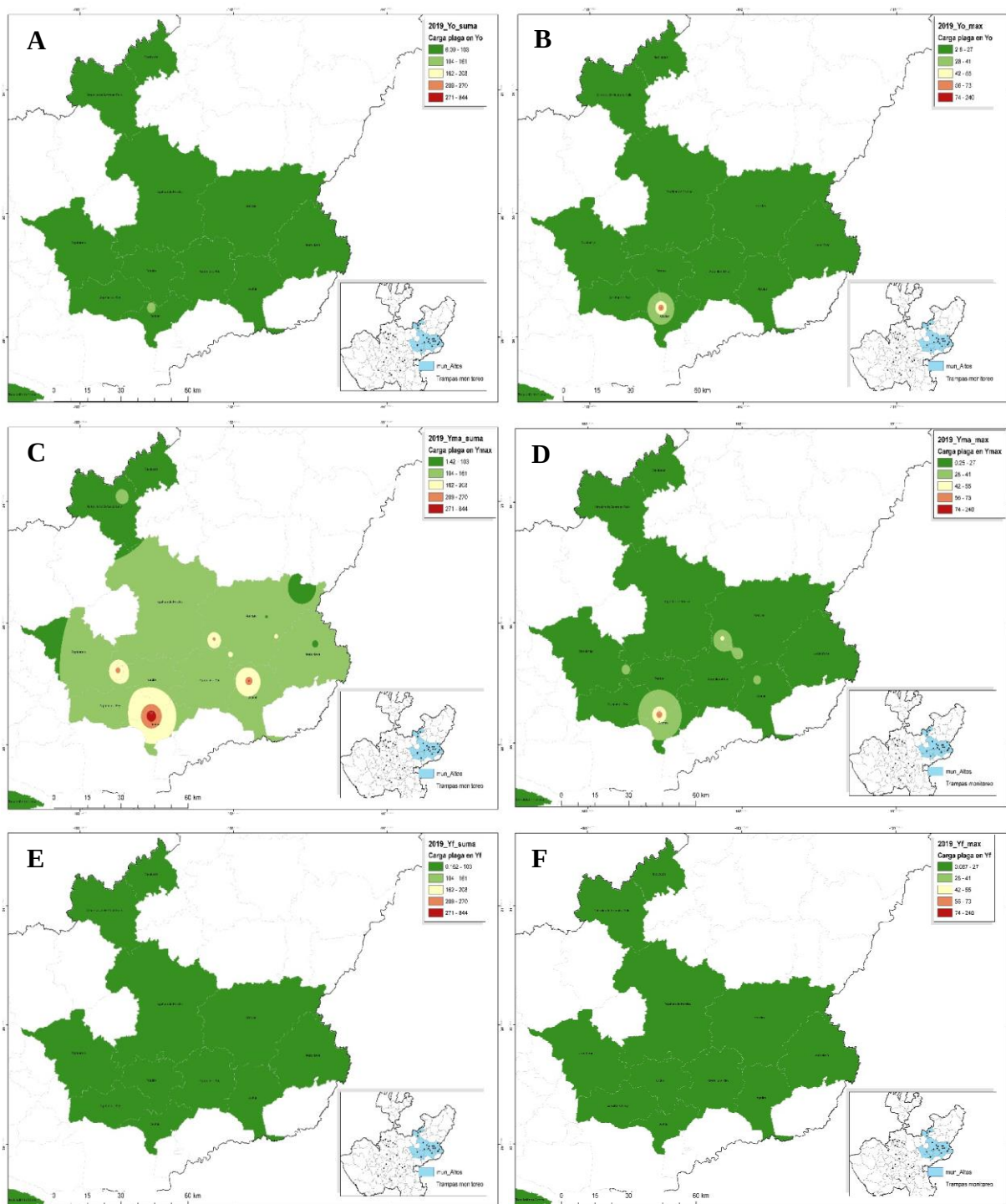


Figura 19. Proyección geo-estadística de la carga de plaga, figuras A, C y E son la suma total de insectos capturados, B, D y F son la máxima carga de plaga en eventos epidemiológicos Y_o, Y_{max} y Y_f en Los Altos de Jalisco, durante el periodo 2019.

4.6. Implicaciones del comportamiento climático en la carga de plaga regional de *S. acupunctatus*

El monitoreo continuo e ininterrumpido de 20 sensores climáticos *in situ* a trampas de captura de picudos adultos, permitieron coleccionar a través del tiempo un total de 10,671,360 datos climáticos, que incluyen variables como; región, municipio, año, fecha de registro, ID trampa, altitud, latitud, longitud, temperatura, % de humedad relativa y punto de rocío. En *Rstudio v1.4.0* se realizaron análisis de datos acumulados por trampa-sensor y se graficó el promedio de humedad relativa y temperatura respecto a la carga de plaga del insecto (Figura 20), para determinar umbrales de inductividad climática en la región Los Altos. Los umbrales se estimaron para actividad-móvil del adulto y *oviposición* e *incubación* de huevo, específicamente en condiciones de campo (Cuadro 5). Se identificaron clústers de carga de plaga por mes, año y región, los cuales se caracterizaron para determinar el umbral (mínimo y máximo) de temperatura y % de humedad relativa.

Para la zona de estudio Los Altos con 20 trampas-sensores distribuidos en 10 municipios de la región, con estratos altitudinales de 1500-2250 msnm, es decir la región productora de mayor altitud en Jalisco, las variables de temperatura °C y %HR durante 2018 - 2019 en (Y_o) estuvieron en el orden de 21.3 (± 1.2) – 21.8 (± 1.3) °C y 42.7 (± 10.8) – 36.3 (± 5.7) %HR, vinculadas con carga de plaga total entre 383 y 212 insectos por trampa (*ipt*). Particularmente la temperatura se mantuvo en línea recta con variaciones relativamente estables (1.2 - 1.3) entre años. En la máxima carga de plaga Y_{max} , la temperatura fue 18.8 (± 2.0) – 91.1 (± 2.3) °C y 74.7 (± 9.9) – 73.7 (± 11.0) entre años, vinculada a una carga de 3376 – 1366 respectivamente y 562.7(± 227.2) - 195.1(± 111.2) insectos/trampa. Durante el periodo de internalización, la temperatura en Y_f fue de 15.0 (± 1.0) – 14.5 (± 0.0) °C y 66.7 (± 9.7) – 60.5 (± 0.7) %HR entre años, con carga de plaga de 678 – 229 *ipt* respectivamente (Cuadro 5). La relación entre temperatura y la plaga fue inversamente proporcional, sugiriendo que la disminución en carga de plaga estuvo influenciada en mayor medida por el manejo regional del insecto que por una variación climática. Adicionalmente a pesar que durante el periodo Y_o se realizó la mayor intensidad de Jimas productivas, lo cual implica una mayor migración del insecto hacia nuevos hospederos, este efecto no se

evidenció en carga de plaga la cual disminuyó en 2019. Es decir, la fluctuación poblacional disminuyó, caso inverso con inventarios productivos actuales, que presentaron un registro histórico de 600 millones de plantas en 2019, resultado del dinamismo que se vive en la agroindustria tequilera, lo que conlleva una gran demanda de materia prima para la elaboración del tequila (CRT, 2019).

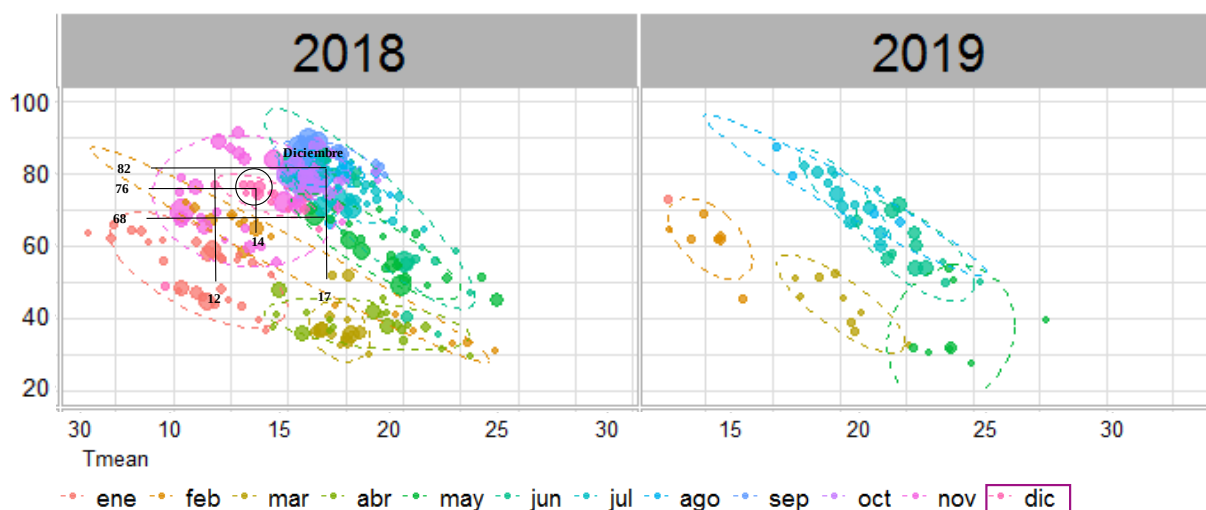


Figura 20. Relación del comportamiento de picudos adultos por mes, año en base a la temperatura (°C) y Humedad relativa (%HR), en la región Los Altos, Jalisco.

Cuadro 5. Integración de datos climáticos y carga de plaga por periodo (Y_o , Y_{max} y Y_f) para la generación de umbrales climáticos por año para el proceso de oviposición e incubación de huevo y actividad-móvil del adulto.

Región	Año	[Periodo secas (Jimas + Migración)] Y_o				[Periodo lluvias (Emergencia + Copu + Mov)] Y_{max}				[Periodo secas (Internalización + Ovi)] Y_f			
		°C	%HR	Carga Plaga	Media / Trampa	°C	%HR	Carga Plaga	Media / Trampa	°C	%HR	Carga Plaga	Media / Trampa
Los Altos	2018	21.3(±1.2)	42.7(±10.8)	383	127.7(±32.3)	18.8(±2.0)	74.7(±9.9)	3376	562.7(±227.2)	15.0(±1.0)	66.7(±9.7)	678	226.0(±66.6)
	2019	21.8(±1.3)	36.3(±5.7)	212	70.7(±101.5)	19.1(±2.3)	73.7(±11.0)	1366	195.1(±111.2)	14.5(±0.0)	60.5(±0.7)	229	114.5(±161.9)
Total		20.7(±1.6)	42.9(±10.6)	2087	160.5(±112.0)	19.2(±2.0)	74.2(±10.4)	12166	553.0(±407.1)	15.5(±1.5)	59.2(±7.8)	4295	330.4(±270.1)

Derivado de los análisis de 10,671,360 datos climáticos obtenidos de trampa-sensor, en MS Excel 2013 y *Rstudio v1.4.0* se realizó el cálculo de umbrales por región y año para los eventos biológicos *oviposición* e *incubación* y actividad móvil del picudo del agave en condiciones de campo. El umbral se definió por evento epidemiológico (Y_o , Y_{max} y Y_f) donde; Y_o es la ventana biológica de migración de picudos adultos por efecto de jimas productivas, en este periodo de marzo – junio las jimas se intensifican debido a que hay un estrés hídrico importante, lo cual aumenta la concentración de grados °Brix en la piña del agave (Bautista *et al.*, 2001). Y_{max} es la ventana que integra la emergencia y movilidad de adultos para copulación, en este periodo (julio – octubre) considera las principales lluvias del año lo cual causa un reblandecimiento de tejido y permite la emergencia de insecto-adulto para movilidad y multiplicación (Figueroa-Castro *et al.*, 2009). Y_f es la ventana biológica que sugiere la internalización del insecto dentro de tejido (piña) para formar galerías e iniciar el proceso de *oviposición* e *incubación* de huevos.

Las condiciones agroecológicas y orográficas de la región fueron variables debido a las diferencias altitudinales, lo cual contribuyó a la generación de umbrales más precisos, por ejemplo, para *oviposición* e *incubación* (Y_f) el umbral de inductividad climática fue de 14.1 – 17 °C y 51.4 – 67 %HR. Para el periodo de emergencia, movilidad y multiplicación (Y_{max}), el umbral mostró °C de 17.2 – 21.2 y %HR 63.8 – 84.6, y para jimas mas migración del insecto (Y_o) el umbral fue de 19.1 – 22.3 °C con %HR 32.3 – 53.5 (Cuadro 6).

Cuadro 6. Umbrales de inductividad climática por ventana biológica, específicamente en condiciones de campo.

Región	Umbral		
	Y_o (Jimas + Migración)	Y_{max} (Emer + Copu + Mov)	Y_f (Inter + Ovi)
Los Altos	19.1 - 22.3 °C	17.2 – 21.2 °C	14 – 17 °C
	32.3 – 53.5 %HR	63.8 – 84.6 %HR	51.4 – 67 %HR

Con los umbrales de inductividad climática ($^{\circ}\text{C}$: %HR) se calcularon las horas favorables de inductividad (*Hrs-fav*) que cumplieron con esos criterios climáticos en la región y evento biológico-epidemiológico (Y_o , Y_{max} y Y_f). Por lo tanto, las *Hrs-fav* se calcularon con la siguiente formula:

$$HFav_i = \sum_{i=1}^3 Hrs_i(a < ^{\circ}\text{C} < b, a < \%HR < b)$$

Donde *Hrs-fav* son la suma de horas favorables en todo el evento biológico-*i* de la región-*j*, *Hrs* son las horas acumuladas por día que cumplen con el criterio de un umbral mínimo (*a*) y máximo (*b*) de $^{\circ}\text{C}$ y %HR.

Las horas favorables de inductividad climática para *oviposición* e *incubación* (Y_f) de huevo en Los Altos [$14-17^{\circ}\text{C}$: 51.4-67 %HR] evidenció que los dos picos poblacionales de mayor intensidad de *S. acupunctatus* fueron precedidos de ventanas de inductividad climática conformadas por periodos de 5-6 meses con condiciones óptimas para este evento biológico. El pico poblacional más alto fue en noviembre 2018 con una carga de plaga total de 1332 insectos, con $\bar{x}$ regional = 66.6 / trampa, obteniendo un total de 2,706 *Hrs-fav* acumuladas en la ventana inductiva de enero-mayo 2018 en toda la región, esto implica un promedio de 270.6 horas inductivas por quincena y 13.5 *Hrs-fav* por trampa/quincena, siendo febrero y abril 2018, los meses con mayor inductividad climática para oviposición. Por su parte, el pico más intenso de 2019 se presentó en junio con 762 insectos acumulados en la región, es decir al menos cuatro meses antes de los picos de 2018. Las *Hrs-fav* acumuladas en este ciclo fueron 1887, con promedio de 11.7 *Hrs-fav*/quincena) (Figura 21A).

Por su parte el evento biológico de emergencia de adultos jóvenes y copulación (Y_{max}) [$17.2-21.2^{\circ}\text{C}$: 63.8-84.6 %HR] de *S. acupunctatus*, presentó en el primer pico poblacional un total de 6127 *Hrs-fav* acumuladas desde Y_f (ventana mayo-octubre), lo que representa un promedio quincenal por trampa de 25.5 *Hrs-fav*, el cual es mayor a la cantidad de horas en el ciclo previo. La inductividad climática para emergencia del adulto joven estuvo en el orden de 30.1 – 31-2 horas favorables

promedio por quincena/trampa. El segundo pico de 2019 reportó 2459 *Hrs-fav* desde Y_f con promedio de 12.3 horas favorables por quincena/trampa, a partir de junio las horas favorables también se mantuvieron estables hasta noviembre, aunque la dinámica de insectos presentó decrementos sostenidos desde junio (Figura 21B). Las horas de inductividad climática en el periodo de emergencia del adulto joven para Los Altos muestra condiciones óptimas permanentes, sin embargo, la carga de plaga ha disminuido por la implantación de medidas de control por parte de los productores, así como también la jima excesiva de predios comerciales de agave azul, esto debido a la demanda de materia prima del agave.

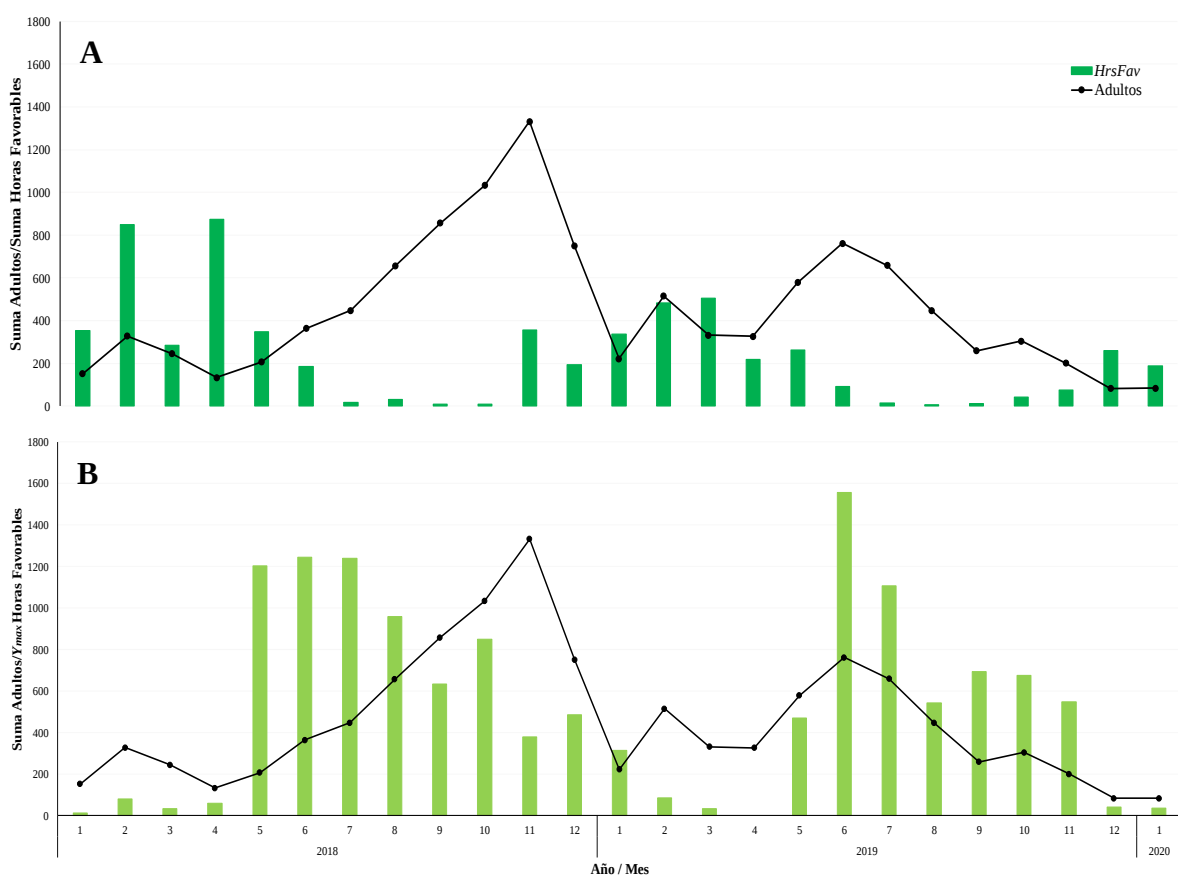


Figura 21. Suma de horas favorables totales para inductividad por evento biológico-epidemiológico en relación a carga de plaga en la región Los Altos: A) ventana Y_f y B) ventana Y_{max} .

4.7. Análisis espacial de inductividad climática favorable para reproducción de *S. acupunctatus* en ventanas biológicas

La proyección geo-estadística (IDW) de horas favorables acumuladas de inductividad climática para la ventana biológica de *Oviposición e incubación* (Y_f) de *S. acupunctatus* en el *Ciclo 1* 2018, evidenció una implicación directa del clima, medida a través de la cantidad horas óptimas para *oviposición* acumuladas o promedio semanal, en los picos poblacionales a nivel regional. En Los Altos la inductividad climática fue de baja a muy baja con suma de 219.5 – 300 *Hrs-fav* con promedio de 3.5 - 4-8 *Hrs-fav/semana*, sin embargo, la carga de plaga se mantuvo con mayor frecuencia con suma total de 162 - 844 y máximos de 42 - 240 insectos por trampa (Figura 22A). En el caso del promedio en Y_f de *Hrs-fav* se identificaron focos-trampas incipientes en Arandas, San Ignacio Cerro Gordo y Yahualica de González Gallo, con inductividad climática moderada (Figura 22B).

Por su parte el *Ciclo 2*, fue más inductivo en condiciones climáticas, pero no en carga de plaga, se registraron ocho focos incipientes de moderada a alta inductividad en los municipios de Ayotlán, Jesús María, Atotonilco, Arandas y Tepatitlán de Morelos, con una suma de 90.5 – 102 *Hrs-fav* y promedio de 2-2-2 *Hrs-fav/semana*, coincidiendo con la carga de plaga en (Y_{max}) 2019, de 104 - 270 picudos totales y promedio de 26 - 55 insectos por trampa (Figura 22C). En el caso del promedio en Y_f el comportamiento climático fue similar a la suma total, reportando los mismos focos inductivos en los municipios de Arandas, Jesús María, Tepatitlán de Morelos, Ayotlán y Atotonilco, lo cual explica porque son los municipios con mayor carga de plaga, ya que hay una relación directa del insecto-clima (Figura 22D).

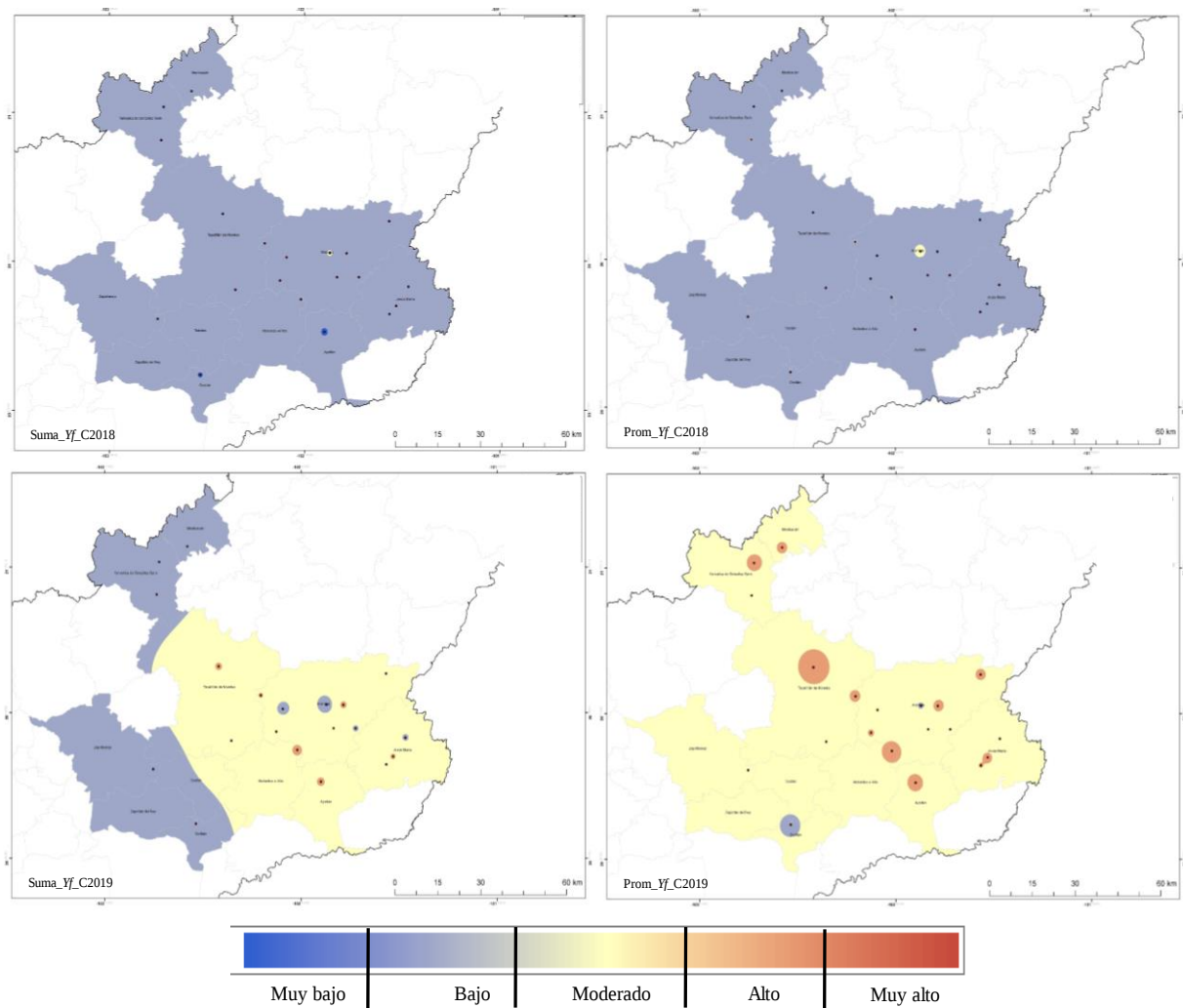


Figura 22. Mapa espacial regional con inductividad climática favorable para oviposición e incubación de huevo de *S. acupunctatus* por ciclo y ventana biológica en (Y): A) Suma total de horas favorables y B) Promedio de *Hrs-fav* en Ciclo 1, 2018. C) Suma total de *Hrs-fav* y D) Promedio de *Hrs-fav* en Ciclo 2, 2019.

4.8. Modelos matemáticos para el pronóstico de alertas tempranas regional de *S. acupunctatus*

Un total de 413,135 registros de 2018 – 2019 se analizaron en SAS® 9.4 para generación de modelos de pronóstico regional por ciclo. Mediante el procedimiento **PROC REG** se ajustaron nueve variables independientes de plaga, clima y horas favorables en modelos de regresión múltiple del tipo $y_i = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 \dots + \beta_n X_n + e_{ij}$, donde y_i representa la respuesta a seis variables explicatorias que incluyeron el promedio, máximo número de capturas, suma y total acumulado de insectos en dos eventos epidemiológicos de importancia para el manejo regional: 1) Y_{max} el cual representa el pico (valor) de mayor intensidad en el ciclo y, 2) Y_i que considera el periodo de incremento exponencial de insectos previo a Y_{max} ; β_0 = parámetro de ordenada al origen, $\beta_{1..n}$ = parámetros asociados a las variables independientes principalmente climáticas, y para estimar Y_{max} se usó la carga de plaga en Y_0 como estimador de riesgo y e = error estadístico implícito en el modelo.

Para la selección de variables significativas se empleó el método de depuración *STEPWISE* el cual realiza iteraciones de todas las variables independientes, una a una, hasta dejar únicamente las variables que cumplen el umbral de significancia solicitado al modelo el cual fue $p\text{-value} < 0.05$. Un ejemplo del código empleado para el modelo de pronóstico regional se muestra a continuación:

```
PROC SORT DATA=MODELS; BY REG CICLO;  
PROC REG DATA=MODELS; BY REG CICLO;  
MODEL y = var1 – var9 / NOINT SELECTION=STEPWISE;  
RUN;
```

Se obtuvo un total de 24 modelos regionales por ciclo (Cuadro 7), los cuales cumplieron con el criterio de significancia $p < 0.05$ a nivel modelo, variable y bondad de ajuste $R^2 > 0.70$. La conformación de modelos fue distinta entre eventos pronosticados Y_{max} y Y_0 y región. En general, los modelos ajustados fueron diversos en su integración de variables, algunos basados en carga de plaga mediante insectos promedio en Y_0 , puramente climáticos con combinaciones diversas de humedad, temperatura y horas favorables de inductividad climática y otros modelos

integrales que incluyeron clima + plaga. En los modelos de pronóstico para estimar carga de plaga en Y_{max} , el promedio de insectos por trampa tuvo buen ajuste en la región Los Altos ($R^2=0.67 - 0.91$). Los mejores modelos fueron con $R^2 = 0.86$ en la región, los cuales incluyeron combinaciones de altitud con carga de plaga promedio y temperatura mínima o máxima asociadas con carga de plaga principalmente para explicar el número máximo de capturas de picudos. Respecto al ciclo 2019, este periodo tuvo mayor asociación de variables puramente climáticas, principalmente combinaciones de temperatura y humedad relativa alcanzando ajustes con $R^2 = 0.82 - 0.91$.

En 2019 se tuvo los mejores modelos para pronosticar Y_0 con $R^2 = 0.95 - 0.99$, con combinaciones de altitud, horas favorables de inductividad climática y la temperatura mínima asociada con la carga de plaga promedio en Y_0 . Los resultados de análisis diferenciado por ciclo estudiado y región productiva demuestran la hipótesis de que anualmente los modelos de pronóstico pueden perder su efectividad en función de las combinaciones climáticas y de carga de plaga en el ciclo previo Y_0 . El monitoreo permanente y la diversidad de variables medidas *in situ* son determinantes para establecer modelos aceptables que permitan estimar riesgos regionales, sin embargo, los cambios puntuales por fechas de captura de insecto en adición al comportamiento de variables climáticas y productivas como jimas fitosanitarias, constituyen la conformación de datos pertinentes para realizar un manejo más efectivo del insecto. Algunos modelos combinados con temperaturas y humedad relativa se repitieron entre años (Cuadro 8).

Cuadro 7. Modelos de pronóstico de *Scyphophorus acupunctatus* en Y_{max} y Y_o en función de variables epidemiológicas medidas en Y_f para la región Los Altos del estado de Jalisco.

Ciclo	Variable Dependiente	No	Modelo: $y = [...]$	Pr > F	R ²
					Los Altos
2018	MaxPic _{Ymax}	1	$Tmin_{Yf}(0.98) + \bar{x}Pic_{Yo}(4.86)$	<.0001	0.64
		2	$\bar{x}Pic_{Yo}(16.81)$	<.0001	-
		3	$alt(0.05) + Hmin_{Yf}(-1.41)$	0.0004	-
	MaxPic _{Yi}	4	$Tmin_{Yf}(10.82) + Tmax_{Yf}(-12.03) + Hmax_{Yf}(1.63)$	<.0001	0.77
		5	$\bar{x}Pic_{Yo}(179.62)$	<.0001	-
		6	$\bar{x}HFav_{Yf}(3.74) + \bar{x}Pic_{Yo}(3.16)$	0.0001	-
	$\sum Pic_{Yax}$	7	$\bar{x}Pic_{Yo}75.35$	<.0001	0.67
		8	$\bar{x}Pic_{Yo}315.33$	<.0001	-
		9	$Tmin_{Yf}(-164.44) + Tmax_{Yf}(126.47) + \bar{x}Pic_{Yo}(69.27)$	0.0009	-
	$\sum Pic_{Yi}$	10	$Tmin_{Yf}(374.8) + Tmax_{Yf}(-410.8) + Hmax_{Yf}(52.23)$	<.0001	0.86
		11	$\bar{x}Pic_{Yo}(179.63)$	<.0001	-
		12	$alt(0.16) + \bar{x}Pic_{Yo}(98.42)$	0.0002	-
	$\bar{x}Pic_{Ymax}$	13	$\bar{x}Pic_{Yo}(5.02)$	<.0001	0.67
		14	$\bar{x}Pic_{Yo}(10.52)$	<.0001	-
		15	$Tmin_{Yf}(-5.48) + Tmax_{Yf}(4.22) + \bar{x}Pic_{Yo}(2.31)$	0.0009	-
	$\bar{x}Pic_{Yi}$	16	$Tmin_{Yf}(4.03) + Tmax_{Yf}(-4.42) + Hmax_{Yf}(0.56)$	<.0001	0.86
		17	$\bar{x}Pic_{Yo}(2.85)$	<.0001	0.86
		18	$\bar{x}HFav_{Yf}(1.23) + \bar{x}Pic_{Yo}(1.36)$	0.0002	-
2019	MaxPic _{Ymax}	19	$Tmax_{Yf}(0.62) + \bar{x}Pic_{Yo}(0.68)$	<.0001	0.82
		20	$Tmin_{Yf}(13.40) + Hmin_{Yf}(-4.76)$	0.0098	-
		21	$Tmax_{Yf}(0.60) + Hmin_{Yf}(-0.11)$	<.0001	-
	MaxPic _{Yi}	22	$alt(0.01) + \sum HFav_{Yf}(-0.04) + \bar{x}Pic_{Yo}(1.68)$	<.0001	0.95
		23	$Tmin_{Yf}(0.18) + \bar{x}Pic_{Yo}(0.79)$	<.0001	-
	$\sum Pic_{Yax}$	24	$Tmin_{Yf}(9.35) + \bar{x}Pic_{Yo}(8.55)$	<.0001	0.82
		25	$Tmax_{Yf}(5.65)$	<.0001	-
	$\sum Pic_{Yi}$	26	$Tmin_{Yf}(4.33) + \sum HFav_{Yf}(-0.16) + \bar{x}Pic_{Yo}(21.31)$	<.0001	0.97
		27	$Tmin_{Yf}(4.04) + Tmax_{Yf}(-1.85) + \bar{x}Pic_{Yo}(12.6)$	<.0001	-
	$\bar{x}Pic_{Ymax}$	28	$Tmin_{Yf}(0.52) + \bar{x}Pic_{Yo}(0.47)$	<.0001	0.82
		29	$Tmax_{Yf}(0.17)$	<.0001	-
	$\bar{x}Pic_{Yi}$	30	$Tmin_{Yf}(0.29) + \sum HFav_{Yf}(-0.01) + \bar{x}Pic_{Yo}(1.42)$	<.0001	0.97
		31	$Tmin_{Yf}(0.27) + Tmax_{Yf}(-0.12) + \bar{x}Pic_{Yo}(0.84)$	<.0001	-

NOTA: **Pic** = Picudos; **Max** = Máximo, **Min** = Mínimo, **T** = Temperatura, **H** = humedad relativa, **HFav** = Horas favorables de inductividad climática, **alt** = altitud de sitio en MSNM, $\bar{x}$ = promedio, $\sum$ = Sumatoria de una variable, **Yo** = inicio del ciclo de *S. acupunctatus*, **Yi** = fase exponencial de incremento constante de insectos y **Ymax** = pico máximo en la fluctuación poblacional.

Cuadro 8. Repetitividad de variables constantes en modelos por año.

Año	Región		Modelo	Variable
	No	Los Altos		
2018	1	x	$Tmin_{Yf}$	$MaxPic_{Ymax}$
	2	x	$\bar{x}Pic_{Yo}$	$\sum Pic_{Yax}$
	3		alt	
	4		$Hmin_{Yf}$	$\bar{x}Pic_{Ymax}$
	5	x	$Tmax_{Yf}(-$	$MaxPic_{Yi}$
	6	x	$Hmax_{Yf}$	$\sum Pic_{Yi}$
	7		$\bar{x}HFav_{Yf}$	$\bar{x}Pic_{Yi}$
2019	8	x	$Tmax_{Yf}$	$MaxPic_{Ymax}$
	9	x	$\bar{x}Pic_{Yo}$	$\sum Pic_{Yax}$
	10	x	$Tmin_{Yf}$	
	11		$Hmin_{Yf}$	$\bar{x}Pic_{Ymax}$
	12	x	alt	$MaxPic_{Yi}$
	13	x	$\sum HFav_{Yf}$	$\sum Pic_{Yi}$ $\bar{x}Pic_{Yi}$

5. DISCUSIÓN

El picudo del agave *Scyphophorus acupunctatus* constituye uno de los problemas fitosanitarios más importantes del cultivo del agave azul (*Agave tequilana* weber var. Azul) dentro de la Denominación de Origen del Tequila (DOT). Las pérdidas económicas debido a esta problemática son el factor de mermas más importante en el sector productivo agave (Virgen-Calleros, 2016), los adultos se encuentran activos durante todo el año y atacan cualquier etapa fenológica del cultivo incluyendo hijuelos, (Solís-Aguilar *et al.*, 2001b). Sin embargo, las plantas maduras o aquellas que presentan algún síntoma de pudrición o marchitez son más atractivas para el insecto, debido a los fenoles que liberan y facilidad de ingreso a la piña, el 95% del daño es causado por las larvas mientras que el adulto es el responsable de ingresar hongos y bacterias oportunistas (Solís-Aguilar *et al.*, 2001b). El manejo fitosanitario de esta plaga actualmente es monitoreado por el Comité Estatal de Sanidad Vegetal del estado de Jalisco (CESAVJAL) con el objetivo de detectar parcelas en riesgo. El uso de insecticidas sintéticos ha sido poco exitoso, debido a que el producto aplicado

no llega hasta donde se encuentra el adulto o larvas una vez ingresados al interior de la piña, por lo que es indispensable aplicarlos cuando el insecto se encuentre expuesto en el exterior de la planta (Terán-Vargas *et al.*, 2013). Investigaciones previas, han sido regionalmente delimitadas, por lo cual en este trabajo se considera la principal región productora de agave en Jalisco, incluyendo 20 parcelas comerciales en monitoreo distribuidas estratégicamente. Esta investigación abarcó 10 municipios pertenecientes a la región Los Altos, con antecedentes históricos de alta carga de plaga (Acevedo-Sánchez *et al.*, 2017), incluyendo variables como extractos altitudinales y niveles de manejo del cultivo y edad de plantaciones (2-3 años). El objetivo principal fue estudiar la fluctuación poblacional del picudo del agave a través del tiempo con enfoque epidemiológico, para la generación de modelos que coadyuven a crear alertas preventivas que ayuden a productores a predecir picos poblacionales. Este trabajo demostró y evidenció dos ciclos poblacionales de *S. acupunctatus* en la región, indicando los meses más inductivos por ciclo, así como la fase inicial (Y_0), máxima (Y_{max}) y final (Y_f), lo cual ayuda a entender el comportamiento biológico del insecto e implementar estrategias de control basadas en alertas preventivas a través del monitoreo continuo del picudo en plantaciones comerciales de agave tequilero (Santana *et al.*, 2020; datos no publicados). Cabe mencionar, que este trabajo se realizó a la par en los sitios de monitoreo con mancha gris del agave (*Cercospora agavicola*) (Coria-Contreras *et al.*, 2018). Por otro lado, el sexado de machos y hembras evidenció prevalencia a favor de las hembras con respecto a los machos, dato que coincide con lo reportado por Figueroa-Castro *et al.*, 2009, donde la proporción sexual en Ahualulco de Mercado fue de 1:1 y en Amatitán de 1:1:03. Por lo tanto, las estrategias de control deben ser enfocadas a ambos sexos, ya que cualquiera puede iniciar la colonización de una planta (Figueroa-Castro *et al.*, 2015).

6. CONCLUSIONES

Este trabajo complementa a nivel regional el estudio epidemiológico del picudo del agave *S. acupunctatus* en plantaciones comerciales de *agave tequilana* var. Azul en el estado de Jalisco. El monitoreo regional del insecto, a través del seguimiento de dinámicas poblacionales regionales y subregionales son un indicador de riesgo para la identificación de ventanas de inductividad poblacional, con fines de implementar acciones de manejo para reducir carga de plaga. Durante la fase experimental 2018-2019 en la región Los Altos (20 parcelas en monitoreo) se identificaron dos ciclos poblacionales, el primer ciclo se presentó de marzo 2018 a marzo 2019, con Y_{max} de 19-24 insectos por trampa (*ipt*) en julio – noviembre y el segundo ciclo se presentó de marzo – noviembre 2019, el cual fue de menor intensidad, con un máximo de 11-14 *ipt* en mayo - julio, observándose un decremento general de la plaga. Esto se debió posiblemente a que, en 2018, hubo jimas constantes en todo el estado por el alza de precios/kilo/agave, lo que redujo fuentes de infestación o de inductividad regional del picudo. Los municipios de Zapotlanejo y Tepatitlán de Morelos fueron los más inductivos en 2018, con una carga de plaga en Y_{max} de 10-57 *ipt* en septiembre - octubre. En el ciclo 2019, se reportó un decremento general para todos los municipios a excepción de Zapotlanejo, Atotonilco (julio - noviembre), Ayotlán y San Ignacio Cerro Gordo, que registraron un Y_{max} de 20-30 insectos por trampa en agosto - septiembre.

Los análisis espaciales de la dinámica poblacional de *S. acupunctatus* permitieron identificar focos de mayor inductividad epidémica por eventos biológicos Y_o , Y_{max} y Y_f a nivel regional (Y_o = jimas + migración (marzo-junio), Y_{max} = emergencia + copulación + movilidad (agosto - noviembre), Y_f = internalización + oviposición e incubación (noviembre - febrero). La carga de plaga de insectos totales acumulados en la suma de Y_o en el periodo 2018, mostró de forma general intensidad poblacional muy baja de 5.9 – 103 *ipt* para la región Los Altos. Mientras que en suma de Y_{max} la carga de plaga mostró al municipio de Tepatitlán de Morelos como el más inductivo, con intensidad de 27.6 – 40.6 *ipt*. En el periodo 2019, en suma, de Y_o la intensidad poblacional mostró en Ocotlán carga de plaga de 6.09 – 103 *ipt*, en suma, de Y_{max}

continúa el mismo foco en Ocotlán con intensidad de 42 – 73 insectos, para el resto de los municipios la carga de plaga fue muy baja, con menos de 27 insectos.

Adicionalmente, el monitoreo paralelo de clima para cuantificar la inductividad climática en la región permitió determinar de forma anticipada áreas con condiciones óptimas para el desarrollo biológico del insecto. Por lo tanto, la especificación de periodos de alta carga de plaga (picos poblacionales) en conjunto con la inductividad climática son elementos que permiten la toma de decisiones oportunas. A través del análisis de inductividad climática, se generaron umbrales por evento biológicos de *S. acupunctatus* (Y_o , Y_{max} y Y_f), oviposición e incubación de huevo y actividad-móvil del picudo en condiciones de campo por año, por ejemplo, para internalización y oviposición (Y_f) el umbral de temperatura y humedad relativa fue de 14 – 18.4 °C y 48.2 – 67 %HR, para el periodo de emergencia de adultos y multiplicación (Y_{max}), el umbral mostró ser de 17.2 – 21.2 °C y 63.8 – 84.6 %HR, mientras que para el periodo de jimas y migración (Y_o) fue de 19.1 – 22.3 °C con 32.3 – 53.5 %HR. Con los umbrales de inductividad climática (°C: %HR) se calcularon horas favorables de inductividad ($Hrs-fav$) que cumplieron con esos criterios climáticos en la región y evento biológico-epidemiológico. Con lo anterior se pudo evidenciar picos poblacionales de mayor intensidad de *Scyphophorus acupunctatus* los cuales fueron precedidos de ventanas de inductividad climática conformadas por periodos de 5-6 meses con condiciones óptimas para cada evento biológico. En la proyección espacial geo-estadística las $Hrs-fav$ estuvieron altamente correlacionadas con la carga de plaga en Y_{max} de cada ciclo, donde evidencia una implicación directa del clima a través de la cantidad de horas favorables óptimas para oviposición e incubación de huevo acumuladas o promedio semanal, en los picos poblacionales a nivel regional.

Se obtuvieron un total de 24 modelos regionales por ciclo, los cuales cumplieron con el criterio de significancia $p < 0.05$ a nivel modelo, variable y bondad de ajuste $R^2 > 0.70$. Para estimar carga de plaga en Y_{max} , 2018 tuvo mejor ajuste con ($R^2=0.67 - 0.91$). En el ciclo 2018, los mejores modelos fueron con $R^2 = 0.86$ con variables suma de picudos totales y temperatura máxima-mínima, para el ciclo 2019, la mayor asociación fue con variables climáticas, alcanzando ajustes de $R^2 = 0.82 - 0.91$, la

combinación de altitud, horas favorables de inductividad climática y la temperatura mínima asociada con la carga de plaga promedio en Y_0 fueron los mejores modelos con $R^2 = 0.95 - 0.97$.

7. LITERATURA CITADA

- Ayala-Escobar, V., Yáñez-Morales, M. de J., Braun U, Groenewald JZ and Crous PW. (2005). *Cercospora agavicola* –a new foliar pathogen of *Agave tequilana* var. Azul from México. Mycotaxon. Volumen 93, pp 115-121.
- Aquino B. T., Reyes, C. G., Valdez, H. M., Martínez, S. D., Gallegos, M. V. (2006). Colecta e índices de patogenicidad de nematodos y hongos entomopatógenos nativos en el picudo de agave (*Scyphophorus acupunctatus* Gyllenhal) en Oaxaca, México. *Revista Mexicana de Agroecosistemas*; Vol. IV, Núm. 2 (Suplemento 2). 6(1): 92-101.
- Aquino B. T., Ruiz V., J. y Martínez S., D. (2010). Ecología y biología de *Scyphophorus acupunctatus* Gyllenhal (Coleoptera: Curculionidae), plaga del agave mezcalero en los Valles Centrales de Oaxaca. *Naturaleza y desarrollo* (8), pp: 59-68. Centro interdisciplinario de investigación para el desarrollo integral regional.
- Acevedo-Sánchez, G y Mora-Aguilera, G. (2016). Desarrollo de REG-N Café v1.0 para determinar n-sitios de monitoreo-muestreo regionales de roya del cafeto en México, usando criterios epidemiológicos ponderados. 49º Congreso Brasileiro de Fitopatología. Maceió, Brasil 26-30 agosto de 2016.
- Booth, R. G., Cox, M. L. and Madge, R. B. (1990). Coleoptera. International Institute of Entomology (an institute of CAB international). Cambridge University Press. Cambridge, UK.
- Bautista J. M., García, O. L., Salcedo, H. R., Parra, N. L. A. (2001). Azúcares en agaves (*Agave tequilana* Weber) cultivados en el estado de Guanajuato. *Acta Universitaria*. Volumen 11, Numero 1. Guanajuato, México.
- Beltrán G. M. C., Ogura, F. T., Pimienta, B. E., Santerre, L. A., Moya, R. G. Sánchez, G. J., Guzmán, D. L. (2005). El picudo *Scyphophorus acupunctatus* Gyll. (Coleoptera: Curculionidae) y su microbiota asociada al tejido dañado de *Agave tequilana* Weber var. Azul M. Sc. Tesis no publicada. Universidad de Guadalajara, Jalisco, México.
- Bouchet, C. (2016). Agroecología -3- los modelos matemáticos. <http://culturagriculture.blogspot.com/2016/08/86-agroecologia-3-los-modelos.html> Citado el 17/marzo/2020.

- Carreño C. R., Gómez, C. M. A., Barranco, V. P., García, C. T., Andujar, S. A. Modelos matemáticos de depredador-presa en cultivos hortícolas en invernadero en el Sudeste de la Península Ibérica. (2000). Boletín de Sanidad Vegetal. Plagas. pp: (26): 665-672. Vol. 26, No. extra 4.
- Camino L. M., Castrejón, G., V. Figueroa B., R. Aldana L., L. Valdés E., M. E. (2002). *Scyphophorus acupunctatus* (Coleoptera: Curculionidae) attacking polianthes tuberosa (Liliales: Agavaceae) in Morelos, México. *Florida Entomologist*, 85 (2): 392-393. URL: [https://doi.org/10.1653/0015-4040\(2002\)085\[0392:SACCAP\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1653/0015-4040(2002)085[0392:SACCAP]2.0.CO;2).
- CESAVEG. (2008). Manual de Plagas y Enfermedades del Agave. Campaña Manejo Fitosanitario de Cultivos Perennes. Comité Estatal de Sanidad Vegetal de Guanajuato, A.C.
- CESAVEJAL. (2011). Guía de referencia para identificar plagas, enfermedades y enemigos naturales asociados al agave azul en Jalisco. Campaña de Manejo Fitosanitario del agave. Comité Estatal de Sanidad Vegetal de Jalisco, A. C. SAGARPA.
- CONAGUA. (2015). Comisión Nacional del Agua. Consultado el 25 de marzo del 2020 en: <https://www.gob.mx/conagua>
- Coria-Contreras, J. J., Mora-Aguilera, G., Yáñez-Morales, M. J., Acevedo-Sánchez, G., Santana-Peñaloza, B., Mendoza-Ramos, C., Jiménez-González, L., Martínez-Bustamante, V. I., García-Martínez, D. C., and Rubio-Cortés, R. (2018). Applied regional epidemiology to the inductive characterization and forecasting of blue agave gray spot (*Cercospora agavicola*) in Jalisco, México. *Mexican Journal of Phytopathology* 37(1): 71-94. DOI: 10.18781/R.MEX.FIT.1809-4.
- CRT. (2019). Consejo Regulador del Tequila. Agencia Reforma. Consultado el 25 de marzo 2020. Disponible en: <https://www.dallasnews.com/espanol/al-dia/mexico/2020/01/19/mexico-2019-fue-ano-record-para-la-produccion-y-exportacion-de-tequila/>
- CABI. (2020). International Agricultural Bioscience Center. Invasive Species Compendium. *Scyphophorus acupunctatus* (picudo del agave). Consultado el 25 de marzo del 2020. Disponible en: <https://www.cabi.org/isc/datasheet/49421#toDistributionMaps>
- Dahlgren, R. M., Clifford, H. T., y Yeo, P. F. (1985). The families of monocotyledons; structure, evolution and taxonomy. Book. Springer-verlag, Berlin, Germany.

- Delgadillo-alemán, S. E., Kú-Carrillo, R. A., Vela-Arévalo, L. V. (2006). Modelación matemática del control de plagas en un cultivo de Brócoli. Revista del departamento de Matemáticas y Física de la Universidad Autónoma de Aguascalientes.
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (2012). Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-006-SCFI-2012, Bebidas alcohólicas-Tequila-Especificaciones. Comité Consultivo Nacional de Normalización de Seguridad al Usuario, Información Comercial y Prácticas de Comercio. Consultado en: http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5282165&fecha=13/12/2012
- Escobar-Guzmán, R. E. (2009). Estudio de la biología reproductiva y análisis molecular de la reproducción sexual y asexual de *Agave tequilana* Weber var. Azul. Tesis doctorado profesional. Departamento de Ingeniería Genética. Centro de investigación y de estudios avanzados del instituto politécnico Nacional de Irapuato, México. 103 pp.
- Espinosa B. L. A. (2015). Generalidades e importancia de los agaves en México. Desde el herbario CICY 7. pp. 161-164. Centro de Investigación Científica de Mérida, Yucatán, México.
- Figueroa-Castro, P., Solís-Aguilar, J. F., González-Hernández, H., Rojas-León, J. C., Castillo-Márquez, L. E. (2009). Fluctuación poblacional y trampeo de *Scyphophorus acupunctatus* Gyllenhal (Coleoptera: Curculionidae) con feromonal de agregación en plantaciones de agave tequilero en Jalisco. (Tesis de maestría en ciencias, Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco de Mora, México).
- Figueroa-Castro, P., González-Hernández, H., Carrillo-Sánchez, J. L., del Real-Laborde, J. L., Solís-Aguilar, J. L., & Rojas, J. C. (2015). Ambos sexos de *Scyphophorus acupunctatus* (Coleoptera: Dryophthoridae) pueden iniciar la colonización de la planta de Agave (Asparagaceae). *Acta Zoológica Mexicana* (n.s), 31 (3): pp: 495-497.
- González-Díaz, J., C. (2002). Evaluación de insecticidas para el control del picudo del agave *Scyphophorus acupunctatus* Gyllenhal., en Tala, Jalisco, México. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, Edo. de México.
- García M., A. (2007). Los Agaves de México. Ciencias, número 087. Universidad Nacional Autónoma de México Distrito Federal, México. pp. 14-23.
- González-Hernández, H., Del Real-Laborde, J. I., Pacheco-Sánchez. C., & S-Bernal. J. (2007a). Manejo de plagas del agave tequilero. ISBN: 968-839-527-7 Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. Tequila Sauza, S.A. de C.V.

- González-Hernández, H., Solís-Aguilar, J. F., Pacheco-Sánchez, C., Flores-Mendoza, F. J., Rubio-Cortes, R., Rojas-De León, J. C. (2007b). Insectos barrenadores del Agave Tequilero. Manejo de plagas del Agave Tequilero. ISBN: 968-839-527-7 Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. Tequila Sauza, S.A. de C.V.
- González-Hernández, H., Rodríguez-Rebollar, H., Valdés-E, Ma., Hernández-R, Ma. C., Gutiérrez-O, M. and Aldana Li, L. (2010). Determination of the Life Cycle of *Scyphophorus acupunctatus* (Coleoptera: Curculionidae) Under Laboratory Conditions.
- Garay, L., C. (2015). El calor y su efecto en el maíz. TecnoAgro. <https://tecnoagro.com.mx/no.-98/el-calor-y-su-efecto-en-el-maiz> Consultado el 23/marzo/2020.
- Guzmán-Hernández, E., Flores-Colorado, O. E., Acevedo-Sánchez, G., Mora-Aguilera, G., López-Javier, M. A y Gózales-Gómez, R. (2017). APPS como herramientas de soporte epidemiológico aplicado a sistemas regionales de vigilancia epidemiológica. Revista Mexicana de Fitopatología 35 (S): 178-179. <http://rmf.smf.org.mx/suplemento/Suplemento352017.html>
- Hilbert, D. W., Logan, J. A. (1983). Empirical model of nymphal development for the migratory grasshopper, *Melanopus sanguinipes* (Orthoptera: Acrididae). *Entomologic ambient*, Volume 12. Pp:1-5. <https://doi.org/10.1093/ee/12.1.1>
- Hueso, G. E. J., Fallad, C. J., Rosales, A. M. P., Molina, O. J., López, L. M. (2006). Evaluación de Nemátodos Entomopatógenos para el control de larvas de *Scyphophorus acupunctatus* Gyllenhal (Coleoptera: Curculionidae). XXIX Congreso Nacional de Control Biológico, Manzanillo, Colima, México. pp: 464-468
- INEGI. (2015). Instituto Nacional de estadística y geografía. Consultado el 24 de marzo del 2020 en: <https://www.inegi.org.mx/>
- Haro, B., G. (2016). El modelo de predicción de cosechas. Comparación entre zonas productoras de Canarias. *Revista AGROPALCA No. 33*. Plataforma agraria libre de Canarias (PALCA).
- Kontodimas D., C. & Kallinikou E., (2010). First record of the sisal weevil *Scyphophorus acupunctatus* (Coleoptera: Curculionidae) in Greece. *Entomologic Hellenica* 19: 39-41.
- Lock, G. W., (1962). Sisal: Twynty-five years' sisal research, Spottiswoode. Ballantyne and coltd. London and Colchester, Great Britain. 350 pp.
- Lock, H., W. (1969). Sisal: Thirty years' sisal research in Tanzania. 2da Edition. Longmans. London, United Kingdom. 365 pp.

- Lee, C. (2011). Corn Growth Stages and Growing Degree Days: A Quick Reference guide. University of Kentucky College of Agriculture.
- López-Bautista, V., Mora-Aguilera, G., Gutiérrez-Espinosa, M. A., Mendoza-Ramos, C., Martínez-Bustamante, V. I., Coria-Contreras, J. J., Acevedo-Sánchez, G and Santana-Peñaloza, B. (2020). Morphological and molecular characterization of *Fusarium* spp. associated to the regional occurrence of wilt and dry bud rot in *Agave tequilana*. Mexican Journal of Phytopathology 38 (1): 79-106. DOI: 10.18781/R.MEX.FIT.1911-4.
- Mills, W. D. (1944). Manual para el cultivo de frutales en el trópico. Particularidades de los frutales. Modificado por Castañeda-Zapata, J. 2002. Pp 26-37.
- Marco V. (2001). Modelización de la tasa de desarrollo de insectos en función de la temperatura. Aplicación al manejo Integrado de Plagas mediante el método de grados-día. *Bol. S.E.A.*, No. 28, pp: 147-150.
- M Riba J. I. Flinch & Alonso Z., M. A. (2007). El picudo negro de la Pita o Agave, o Max del henequén, *Scyphophorus acupunctatus* Gyllenhal, 1838 (Coleoptera: Dryophthoridae): primera cita para la Península Ibérica. *Boletín Sociedad Entomológica Aragonesa*. ISSN 1134-6094. pp: 419-422.
- Maya Y., Cardiel, P. C., Jiménez, M. L. (2011). El Cardón *Pachycereus pringlei*, nuevo hospedero para *Scyphophorus acupunctatus* (Coleoptera: Curculionidae) in Baja California Sur, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 82: pp:1041-1045.
- Mora-Aguilera, G., Acevedo-Sánchez, G., Calderón-Estrada, G., Flores-Sánchez, J., Domínguez-Monje, S., Baker P y González-Gómez, R. (2014). Consideraciones epidemiológicas del cambio climático en la Fitosanidad de cultivos tropicales. *Revista Mexicana de Fitopatología* 32: 73-93
- Mezo-Villalobos, M., Fucikovsky-Zac, L., Aranda-Ocampo, S. (2014). Identificación del agente causal del anillo rojo en agave tequilero. Tesis de maestría en ciencias. Fitosanidad, Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, México. 88 pp.
- Pérez S., P. (1980). Principales problemas fitosanitarios del maguey pulquero (*Agave atrovirens* Karw). En la mesa central de México. Tesis profesional. Departamento de parasitología Agrícola. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. pp:69-75
- Pérez-Domínguez, J. F., & Del Real-Laborde, J. I. (1ª, ed.), (2007). Conocimiento y prácticas agronómicas para la producción de *Agave tequilana* Weber en la zona de denominación de origen del tequila. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro de Investigación Regional del Pacífico Centro.

- Parra N. L. A., Villar, Q. P., Prieto, R. A. (2010). Extracción de fibras de agave para elaborar papel y artesanías. *Acta Universitaria*, Vol. 20, núm. 3, pp. 77-83. Universidad de Guanajuato, México. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=41618860011>
- Peña-Martínez, R., Lomelí-Flores, R., Bujano-Muñiz, R., Muñoz-Viveros, A. L., Vanegas-Rico, J. M., Salas-Monzón, R., Hernández-Torres, O. E., Marín-Jarillo, A., Ibarra-Rendón, J. E. (2018). Pulgón Amarillo del sorgo, (PAS), *Melanaphis sacchari* (Zehntner, 1897), Interrogantes biológicas y tablas de vida.
- Quiñones-Pando, F., J. (1997). Tecnología de control de picudo del algodnero. Alternativas Tecnológicas para aminorar la presencia poblacional del picudo del algodnero. Centro de Investigación regional Norte centro Campo experimental La Laguna, Matamoros. Folleto técnico No. 30. Pp:11-16.
- Ramírez-Choza, J. L. (1993). Max del henequén *Scyphophorus interstitialis* Gylh. Biología y control. Serie: Libro Técnico. Centro de investigación Regional del Sureste. Instituto de investigaciones forestales, Agrícolas y pecuarias. Secretaria de agricultura, Ganadería y recursos hidráulicos. Mérida, Yucatán, México.
- Rojas J. C., González, H. H., Ruiz, M. C., Rangel, R. D. N., Ceja, G. E. I., García, C. G. y Del Real, L. I. (2006). Optimización de un sistema de monitoreo/trampeo masivo para el manejo del picudo del agave, *Scyphophorus acupunctatus* Gyllenhal. Simposio sobre Trampas y atrayentes en detección y control de plagas de importancia económica, J. F. Barrera & Montoya (eds.). Sociedad mexicana de entomología y el colegio de la Frontera Sur. Manzanillo, Colima, México. pp. 51-58.
- Rangel-Reyes, D. N. (2007). Compuestos volátiles del *Agave tequilana* Weber variedad azul, que son atractivos para el picudo del agave *Scyphophorus acupunctatus* (Coleoptera: Curculionidae). Tesis de maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados, campus Montecillo, Texcoco, Edo. de México. 97 p.
- Rubio C., R. (2007). Enfermedades del cultivo del agave. P. 169-195 in Rulfo V., F. O. et al. (ed.). Conocimiento y prácticas agronómicas para la producción de *Agave tequilana* Weber en la zona de denominación de origen del tequila. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro de Investigación Regional del Pacifico Centro.
- Ruiz-Montiel, C., García-Coapio, G., Rojas, J. C., Cruz-López, L., Del Real-Laborde, I., González-Hernández, H. (2008) Feromona de agregación para el picudo del agave *Scyphophorus acupunctatus* (Coleoptera: Curculionidae). *Entomología Experimentalist et Applicate*. 127: 207-217. <https://doi.org/10.1111/j.1570-7458.2008.00703.x>

- Rodríguez-Rebollar, H., C-Rojas, J., González-Hernández, H., Ortega-Arenas, L. D., Equihua-Martínez, A., Del Real-Laborde, J. I & López-Collado, J. (2011). Evaluación de un cebo feromonal para la captura del picudo del agave (Coleoptera: Curculionidae). *Acta Zoológica Mexicana (n. s)*, 28 (1): 73-85.
- Romo A., & Morrone J. J. (2012). Especies mexicanas de Curculionidae (Insecta: Coleoptera) asociadas con agaves (Asparagaceae: Agavoideae). *Revista Mexicana de Biodiversidad*. Vol. 83, pp.1025-1035. DOI: 10.7550/rmb.30633.
- Romero R. F. (2014). Manejo Integrado de Plaga: Las bases, los conceptos su mercantilización. Universidad Autónoma Chapingo. Colegio de Postgraduados: Instituto de Fitosanidad, Montecillo, Texcoco, Edo. México.
- Siller J. M. G. (1985). Ciclo biológico del picudo del maguey *Scyphophorus acupunctatus* Gyllenhal (Coleoptera: Curculionidae) y algunas consideraciones sobre su impacto económico. Tesis de Licenciatura. UNAM. México. D.F.
- Solís-Aguilar, J., F. (2001a). El picudo del agave tequilero *Scyphophorus acupunctatus* Gyllenhal (Coleoptera: Curculionidae) en Jalisco, México. Tesis de doctorado. Colegio de postgraduados. Montecillo, Texcoco, Edo. de México.
- Solís-Aguilar, J. F., González-Hernández, H., Leyva-Vázquez, J. L., Equihua-Martínez, A., Flores-Mendoza, F. J., Martínez-Garza, A., (2001b). *Scyphophorus acupunctatus* Gyllenhal, plaga del agave tequilero en Jalisco, México. *Agrociencia*, vol. 35, núm. 6, pp. 663-670. Colegio de postgraduados campus Montecillo, Texcoco, México.
- Servín R., T. Arce M., A & Robert L., M. (2006). *Scyphophorus acupunctatus* Gyllenhal (Coleoptera: Curculionidae) como potencial insecto-plaga de *Yucca valida brandegeei* en Baja California Sur, México. *Folia Entomológica Mexicana*, vol. 45, núm. 1, pp. 1-7.
- SENASICA-DGSV. (2011). Ficha técnica del picudo del agave (*Scyphophorus acupunctatus*). Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria. Dirección General de Sanidad vegetal-Centro Nacional de Referencia Fitosanitaria-Grupo especialista. Tecámac, México. pp10.
- Sistema Producto Nacional Agave Tequilana (SPNAT). (2012). Análisis de la problemática del sistema producto agave tequila. Acta constitutiva del sistema producto *agave tequilana* en Jalisco.
- Suris C. M., Pérez, Z. J. C., Miranda, I. (2013). Competencia interespecifica entre *Heliothis virescens* (F.) y *Spodoptera frugiperda* Smith (Lepidoptera:

- Noctuidae) en el cultivo del garbanzo (*Cicer arietinum* L.). *Revista de Protección vegetal*. Volumen 28. No. 3 pp: 171-177.
- Santana-Peñaloza, B., Acevedo-Sánchez, G., Coria-Contreras, J. J., Mora-Aguilera, G., González-Gómez, R., López-Buenfil, A. (2015). CALCULA-HF v.1.0: Estimación de horas favorables de inductividad epidémica debido a la germinación de uredosporas de *Hemileia vastatrix*. *Revista Mexicana de Fitopatología*. Volumen 33, Suplemento, 2015, pp: S119-120. Consultado en: <https://www.smf.org.mx/rmf/suplemento/Suplemento332015.html>
- SIAP. (2015 y 2018). Servicio de Información Agrícola y Pesquera. SAGRAPA. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/> (Consultado en enero 2015 y abril 2018).
- SENASICA-DGSV. (2016). Picudo del agave (*Scyphophorus acupunctatus* Gyllenhal 1898). Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria, Dirección General de Sanidad Vegetal-Centro Nacional de Referencia Fitosanitaria-Grupo Especialista Fitosanitario. Ficha Técnica. Tecámac, México pp 13.
- SIAP. (2019). Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Avances de Siembra y Cosechas. Consultado el 17 de febrero 2020. Disponible en: http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola_siap_gobmx/ResumenProducto.do
- Sistema de inversión digital agave. (2020). Consultado el 15 septiembre del 2020 en: <https://www.jima.mx/>
- Terán-Vargas, A. P., Azuara-Domínguez, A. (2013). El picudo *Scyphophorus acupunctatus* Gyllenhal y su manejo en el agave tequilero (*Agave tequilana* F.A.C Weber) variedad Azul. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro de investigación regional del Noreste Campo Experimental Las Huasteca. Folleto Técnico No. MX-0-310304-52-03-14-09-35. ISBN: 978-607-37-0181-5.
- University of California, Agriculture and Natural Resources. (2014). Metodología para el cálculo de unidades calor diseñada por la University of California, Agriculture and Natural Resources, emplead in el SIMARBC.
- Valenzuela Z., A. G. (1995). La agroindustria del agave tequilero *Agave tequilana* Weber. Boletín de la sociedad Botánica de México, Número 57. pp. 15-25. Departamento de Botánica y Zoología, Universidad de Guadalajara, Jalisco.
- Valdés R., S. Ramírez C., J. L. Reyes L., J. Blanco L., A. (2004). Respuestas del insecto Max (*Scyphophorus acupunctatus*) Gyllenhal (Coleoptera: Curculionidae) hacia algunos compuestos atrayentes del henequén. *Acta Zoológica Mexicana (n. s)*, 20 (3):157-166.

- Valdés-Estrada, M. E., Gutiérrez-Ochoa, M., Aldana-Llanos, L., y Figueroa-Brito, R. (2004). Evaluación de dos dietas naturales para la cría de *Scyphophorus acupunctatus*. *Proc. Interamer, Soc. Trop. Hort.* (48) pp: 53-55.
- Virgen-Calleros, G. (2006). Estado actual del manejo de plagas y enfermedades del agave tequilero: Memoria Simposio Prioridades Fitosanitarias Actuales en el Cultivo de *agave tequilana* Weber var. Azul. Manzanillo, Colima, México. 77-85.
- Vargas R & Rodríguez, S. (2007). Dinámica de poblaciones. Manejo integrado de plagas de Palto y Cítricos. Capítulo 7. pp:99-105.
- Verduzco-Martínez, J., Pedro-Rojas, C. I., Mercado-Hernández, R. (2008). Caracterización e identificación taxonómica del maguey. VII Simposium-Taller "Producción y aprovechamiento del Nopal en el Noreste de México". Facultad de Ciencias Biológicas de la Universidad Autónoma de Nuevo León, México.
- Valdés-Estrada, M. E., Hernández-Reyes, C., Gutiérrez-Ochoa, M., & Aldana-Llanos, L. (2010). Determination of the life cycle of *Scyphophorus acupunctatus* (Coleoptera: Curculionidae) under laboratory conditions. *Florida Entomologist*, 93 (3), pp: 398-402. <https://doi.org/10.1653/024.093.0312>
- Vicente-Ramirez, I. (2019). Reporte de inventarios productivos agave. Consultado el 22 de octubre, 2020. Disponible en: <https://www.brunoticias.com/terminara-2019-con-600-millones-de-agaves-sembrados/>
- Westhoven, A. (2016). Growing degree units (GDU's) for corn growth development. [http://www.agrigold.com/Universal/Articles/Growing-Degree-Units-\(GDU%E2%80%99s\)-for-Corn-Growth-D-\(4\)/](http://www.agrigold.com/Universal/Articles/Growing-Degree-Units-(GDU%E2%80%99s)-for-Corn-Growth-D-(4)/) Consultado el 23/marzo/2020.