



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
DIRECCIÓN DE POSGRADO

MAESTRIA EN AGRONOMÍA MENCIÓN CAMBIO CLIMÁTICO

PREDICCIÓN DE LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE EL
DAÑO POTENCIAL DE UNA ESPECIE DE COGOLLERO EN EL
CULTIVO DE MAÍZ (*Zea mays*) EN LA PROVINCIA DE TUNGURAHUA

**Trabajo de investigación, previo a la obtención del Grado Académico de
Magister en Agronomía mención Cambio Climático**

AUTOR: Ing. Galo Eduardo Carranza Arévalo

DIRECTOR: Ing. Agr. Carlos Luis Vásquez Freytez, Ph. D.

AMBATO – ECUADOR

2020

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
DIRECCIÓN DE POSGRADO
MAESTRIA EN AGRONOMÍA MENCIÓN CAMBIO CLIMÁTICO

INFORMACIÓN GENERAL

TEMA: PREDICCIÓN DE LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE EL DAÑO POTENCIAL DE UNA ESPECIE DE COGOLLERO EN EL CULTIVO DE MAÍZ (*Zea mays*) EN LA PROVINCIA DE TUNGURAHUA

AUTOR: Ing. Galo Eduardo Carranza Arévalo

Grado académico: Ingeniero Agrónomo

Correo electrónico: educarranza@hotmail.es

DIRECTOR: Ing. Agr. Carlos Luis Vásquez Freytez, Ph. D.

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: Medio Ambiente

A la Unidad Académica de Titulación de la Facultad de Ciencias Agropecuarias

El Tribunal receptor del Trabajo de Investigación, presidido por el Ingeniero Marco Pérez Salinas Magíster, e integrado por los señores: Ingeniero Giovanni Patricio Velástegui, Magister, y la Ingeniera Rita Cumandá Santana, Magister, designados por la Unidad Académica de Titulación de la Universidad Técnica de Ambato, para receptor el Trabajo de Investigación con el tema: PREDICCIÓN DE LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE EL DAÑO POTENCIAL DE UNA ESPECIE DE COGOLLERO EN EL CULTIVO DE MAÍZ (*Zea mays*) EN LA PROVINCIA DE TUNGURAHUA, elaborado y presentado por el señor Ingeniero Galo Eduardo Carranza Arévalo, para optar por el Grado Académico de Magíster en Agronomía; una vez escuchada la defensa oral del Trabajo de Investigación; el Tribunal aprueba y remite el trabajo para uso y custodia en las bibliotecas de la UTA.



Firmado electrónicamente por:

MARCO OSWALDO
PEREZ SALINAS

Ing. Marco Pérez Salinas, Mg.
Presidente del Tribunal



Firmado electrónicamente por:

GIOVANNY
PATRICIO
VELASTEGUI ESPIN

Ing. Giovanni Patricio Velástegui, Mg.
Miembro del Tribunal



Firmado electrónicamente
por: RITA CUMANDA
SANTANA MAYORGA

Ing. Rita Cumandá Santana, Mg.
Miembro del Tribunal

AUTORÍA DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

La responsabilidad de las opiniones, comentarios y críticas emitidas en el Trabajo de Investigación, presentado con el tema: “PREDICCIÓN DE LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE EL DAÑO POTENCIAL DE UNA ESPECIE DE COGOLLERO EN EL CULTIVO DE MAÍZ (*Zea mays*) EN LA PROVINCIA DE TUNGURAHUA”, le corresponde exclusivamente al Ingeniero Galo Eduardo Carranza Arévalo, bajo la Dirección del Ing. Agr. Carlos Luis Vásquez Freytez, PhD.; y el patrimonio intelectual a la Universidad Técnica de Ambato.



Ing. Galo Eduardo Carranza Arévalo

C.C.: 1805195672

AUTOR



Firmado electrónicamente por:

**CARLOS
LUIS
VASQUEZ
FREYTEZ**

Ing. Agr. Carlos Luis Vásquez Freytez, PhD.

Pasaporte: 073025911

DIRECTOR

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que el Trabajo de Investigación, sirva como un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los Derechos de mi trabajo, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este, dentro de las regulaciones de la Universidad.



Ing. Galo Eduardo Carranza

Arévalo

C.C.: 1805195672

DEDICATORIA

El presente trabajo de investigación lo dedico a Dios, por guiarme por el camino del bien, darme fuerzas para seguir adelante y no desfallecer.

A todos los que han colaborado en mi formación personal, académica y espiritual; un eterno e infinito, gracias.

A mi hija Dulce María, ser tu padre fue lo mejor que pudo pasarme en la vida, ver tu sonrisa es el mayor premio a mis esfuerzos y disfrutar de tu rostro dormido es el más poderoso bálsamo para llenarme de paz.

AGRADECIMIENTOS

A ti Dios, por bendecirme día a día y permitirme hacer realidad mis sueños. los profesores y personal de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Técnica de Ambato, que con sus conocimientos y consejos aportaron a mi formación académica.

Son muchas las personas que han formado parte de mi vida profesional a las que me encantaría agradecerles su amistad, consejos, apoyo, ánimo y compañía. Algunas están aquí conmigo y otras en mis recuerdos y en mi corazón, sin importar en donde estén quiero darles las gracias por formar parte de mí, por todo lo que me han brindado y por todas sus bendiciones

ÍNDICE GENERAL

1. CAPÍTULO I.....	1
1.1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.2. JUSTIFICACIÓN	3
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	7
2. CAPÍTULO II.....	8
2.1. ESTADO DEL ARTE	8
2.1.1. Aspectos bioecológicos de <i>S. frugiperda</i> y su importancia en el cultivo de maíz.....	8
2.1.2. Modelos predictivos en la distribución de plagas	12
2.1.3. Fundamentación filosófica.....	20
2.1.4. Fundamentación legal.....	21
3. CAPÍTULO III.....	22
3.1. METODOLOGÍA	22
3.1.1. Enfoque	22
3.1.2. Modalidad básica de la investigación.....	22
Población y muestra.....	22
a. Análisis para la severidad.....	23
b. Análisis para la incidencia.....	24
Análisis estadístico.....	25
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	26
A. RELACIÓN ENTRE LA SEVERIDAD DE <i>S. FRUGIPERDA</i> Y LOS PARÁMETROS CLIMÁTICOS EVALUADOS	26
ANÁLISIS DE DATOS	27
B. RELACIÓN ENTRE LA INCIDENCIA DE <i>S. FRUGIPERDA</i> Y LOS PARÁMETROS CLIMÁTICOS EVALUADOS	34
ANÁLISIS DE DATOS	35
CONCLUSIONES	42
RECOMENDACIONES	43
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	44

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Análisis de varianza considerando las variables climáticas	28
Tabla 2. Análisis de varianza considerando todas las variables climáticas	28
Tabla 3. Análisis de varianza considerando todas las variables climáticas	29
Tabla 4. Análisis de varianza considerando todas las variables climáticas	29
Tabla 5. Análisis de varianza considerando las variables climáticas	29
Tabla 6. Análisis de varianza considerando las variables climáticas	30
Tabla 7. Análisis de varianza considerando las variables climáticas	30
Tabla 8. Análisis de varianza considerando las variables climáticas	31
Tabla 9. Análisis de varianza considerando las variables climáticas	31
Tabla 10. Análisis de varianza considerando las variables climáticas	31
Tabla 11. Análisis de varianza para la comparación de modelos.....	32
Tabla 12. Análisis de varianza considerando las variables climáticas	36
Tabla 13. Análisis de varianza considerando las variables climáticas	36
Tabla 14. Análisis de varianza considerando las variables climáticas	37
Tabla 15. Análisis de varianza considerando las variables climáticas	37
Tabla 16. Análisis de varianza considerando las variables climáticas	37
Tabla 17. Análisis de varianza considerando las variables climáticas	38
Tabla 18. Análisis de varianza considerando las variables climáticas	38
Tabla 19. Análisis de varianza considerando las variables climáticas	38
Tabla 20. Análisis de varianza considerando las variables climáticas	39
Tabla 21. Análisis de varianza para la comparación de los modelos	39

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Datos transformados de porcentaje de severidad del daño de <i>S. frugiperda</i>	26
Figura 2. Análisis gráfico de las interacciones entre las variables climáticas y la severidad del daño causado por <i>S. frugiperda</i>	27
Figura 3. Comparación gráfica de los modelos	33
Figura 4. Datos transformados de porcentaje de severidad del daño de <i>S. frugiperda</i>	34
Figura 5. Análisis gráfico de las interacciones entre las variables climáticas y la incidencia de <i>S. frugiperda</i>	35
Figura 6. Comparación gráfica de los modelos	40

RESUMEN

El gusano cogollero del maíz, *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) es una especie plaga nativa de América y se encuentra distribuida en todo el continente. Debido al efecto del cambio climático, recientemente esta especie se ha convertido en una plaga invasiva en África y Asia, constituyendo una seria amenaza en el cultivo de maíz. En el presente estudio se intentó diseñar un modelo predictivo sobre el impacto del cambio climático en el nivel de daño e incidencia del cogollero del maíz en la zona andina ecuatoriana. El modelo se basó en el establecimiento de correlaciones múltiples y simples entre los factores climáticos (temperatura, precipitación y humedad relativa) y la incidencia y severidad de la plaga, usando lenguaje R. De acuerdo con el análisis de regresión no se detectó una correlación significativa entre las variables climáticas y el daño e incidencia de *S. frugiperda*. Sin embargo, el nivel de severidad mostró una tendencia cuadrática con las variables climáticas, siendo más pronunciada con la humedad relativa y la temperatura, mientras que el efecto de la precipitación fue más leve la incidencia mostró una relación cuadrática con la humedad relativa con incrementos entre los niveles de humedad entre 78 y 84 %, pero con relación a la temperatura, la incidencia mostró una tendencia a disminuir con la disminución de la temperatura. Mientras que con la precipitación se observó una tendencia muy leve de incrementar con niveles de precipitación alrededor de los 200 mm/mes. Basados en los resultados obtenidos, se sugiere evaluar modelos predictivos que consideren evaluaciones de las variables climáticas (temperaturas mínimas y máximas, precipitación) diferenciando en varios momentos del día (mañana, tarde, noche), de modo de poder realizar modelos más ajustados y además repetir el presente análisis considerando datos de la región Amazonia y Costa de manera de verificar el ajuste de los modelos planteados en la presente investigación.

Palabras clave: gusano cogollero, modelo predictivo, análisis de regresión, Tungurahua, nivel de daño, incidencia.

ABSTRACT

The fall army worm, *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) is a pest species native to America and is distributed throughout the continent. Because of climate change, this species has recently become an invasive pest in Africa and Asia, posing a serious threat to corn cultivation. In the present study, an attempt to design a predictive model on the impact of climate change on the level of damage and incidence of the fall armyworm was made in the Ecuadorian Andean region. The model was based on establishing multiple and simple correlations between climatic factors (temperature, precipitation, and relative humidity) and the incidence and severity of the pest, using R language. According to the regression analysis, no significant correlation was detected between climatic variables and damage and incidence of *S. frugiperda*. However, the severity level showed a quadratic trend with the climatic variables, being more pronounced with relative humidity and temperature, while the effect of precipitation was milder, the incidence showed a quadratic relationship with relative humidity with increases between humidity levels between 78 and 84%, but in relation to temperature, the incidence showed a tendency to decrease with decreasing temperature. While with precipitation, a very slight trend was observed to increase with precipitation levels around 200 mm / month. Based on the results obtained, it is suggested to evaluate predictive models that consider evaluations of climatic variables (minimum and maximum temperatures, precipitation) differentiating at various times of the day (morning, afternoon, night), in order to be able to carry out more adjusted models and also repeat this analysis considering data from the Amazonia and Costa region in order to verify the fit of the models proposed in this investigation.

Key words: fall army worm, predictive model, regression analysis, Tungurahua, damage level, incidence

1. CAPÍTULO I

1.1. Introducción

El gusano cogollero del maíz, *Spodoptera frugiperda* (Smith) (Lepidoptera: Noctuidae) es una especie plaga nativa de América. La polilla puede encontrarse durante todo el año desde el sur de La Pampa, Argentina, hasta el norte de Florida y Texas, Estados Unidos (Early *et al.*, 2018). Este insecto ha sido reconocido como una importante plaga en América (Murúa *et al.*, 2015; Early *et al.*, 2018). Además, se ha extendido hasta África (Goergen *et al.*, 2016) y Asia (Srikanth *et al.*, 2018) y ha sido interceptado en Europa (CABI, 2020).

En cuanto a los hospederos de *S. frugiperda* se ha registrado un total de 353 especies pertenecientes a 76 familias de plantas (Montezano *et al.*, 2018). Entre las plantas más atacadas se incluyen maíz, *Zea mays* L.; arroz, *Oriza sativa* L.; sorgo, *Sorghum bicolor* (L.); millo, *Panicum miliaceum* L.; caña de azúcar, *Saccharum officinarum* L., y algodón, *Gossypium hirsutum* L. (FAO, 2019). A pesar de la preferencia por las plantas de la familia Poaceae, el gusano cogollero se convierte cada vez más, en una plaga de importantes cultivos de hoja ancha como el algodón y la soya, *Glycine máxima* (L.) (Barros *et al.*, 2010).

El gusano cogollero también ha sido señalado como una de las plagas más destructivas del continente americano y el cultivo donde ocasiona mayores daños es el maíz (Murúa *et al.*, 2003). Ataca este cultivo con niveles de densidad variables, pero siempre poniendo en riesgo la productividad del mismo, sobre todo si ataca plantas jóvenes (Casmuz *et al.*, 2010). En Honduras se han registrado pérdidas que fluctúan entre 30 y 40% (Wyckhuys y O'Neil, 2006), mientras que en Argentina la infestación ha alcanzado niveles de 71,3 % (Murúa *et al.*, 2006). En Brasil, se ha registrado la reducción en el rendimiento del cultivo ha llegado al 57% (Cruz *et al.*, 1999).

En Ecuador, el maíz amarillo duro es la base para la elaboración de productos balanceados para alimentar aves de corral, cerdos, tilapia, camarón y ganado (MAGAP, 2016). *S. frugiperda* es el problema fitosanitario más perjudicial para el maíz duro amarillo en Ecuador (Navarrete *et al.*, 2016).

Además de la polifagia presente en *S. frugiperda*, también destaca la capacidad de migrar largas distancias (Nagoshi y Meagher, 2008). Estas características, junto a su poder de aclimatación a diferentes condiciones le han facilitado una amplia distribución geográfica. Esta plaga ya se encuentra en más de 100 países y, particularmente en los trópicos, su reproducción puede ser continua con cuatro a seis generaciones por año (CABI, 2020).

La rápida reproducción, actividad migratoria y alta capacidad de alimentación en numerosas especies de plantas hace que el control de *S. frugiperda* sea un proceso complejo. Por otra parte, los cambios en las condiciones climáticas pueden generar alteraciones en la distribución geográfica, así como en el comportamiento biológico y ecológico de esta especie. Es por ello que, la estimación de las poblaciones de este insecto plaga constituye un factor determinante en el diseño de las estrategias de control. De allí que los modelos predictivos del comportamiento bajo el escenario del cambio climático constituyen herramientas necesarias para los programas de manejo de este insecto plaga.

1.2. Justificación

El maíz (*Zea mays* L.) es el cultivo de cereales de tierras altas y cultivo básico de alimentos primarios más grande del mundo en muchos países en desarrollo (Ram *et al.*, 2017). Junto al arroz y al trigo, el maíz proporciona casi el 30% de las calorías de los alimentos a más de 4.5 mil millones personas en 94 países en desarrollo (Shiferaw *et al.*, 2011); además representan aproximadamente el 42,5 por ciento del suministro mundial de calorías de alimentos, proporcionando alrededor del 37 por ciento de proteínas y 6 por ciento de grasa (FAO, 2016).

El consumo de cereales varía ampliamente según la región. El trigo es el cereal preferido en Asia Central, Medio Oriente, América del Sur y del Norte y Europa. El arroz es el cereal principal en Asia, mientras que el maíz se prefiere en África meridional y oriental, Centroamérica y México (Ranum *et al.*, 2014).

En el año 2018, la producción de maíz en el mundo fue de 1.147.621.938 ton, siendo Estados Unidos el principal productor (392.450.840 ton), seguido de China (257.173.900 ton) y Brasil (82.288.298 ton) (FAO, 2020). Después de Brasil, los países suramericanos con mayor producción de maíz fueron Argentina (43.462.323 ton) y Paraguay (5.344.650 ton). Ecuador produjo 1.324.147 ton, aportando el 0,95% de la producción en Suramérica y el 0,12% en el mundo.

En Ecuador el rendimiento de maíz para el 2017 se registró en 4.002,3 Kg/ha en el 2017, disminuyendo en 9,44% durante el 2018 (FAO, 2020). Diversos factores pueden afectar la productividad del cultivo y entre ellos destacan las plagas y enfermedades, cuyo daño puede representar hasta el 31 % de la producción de maíz en el mundo (Oerke, 2006). Entre las plagas presentes en maíz, *S. frugiperda* es considerada una de las más importantes. Dependiendo de la etapa de crecimiento del cultivo, las larvas del gusano cogollero se alimentan de hojas jóvenes, hojas en espiral, mazorcas, cáscaras y espigas; llegando a causar daños tan graves que ocasionalmente dan como resultado una pérdida total de rendimiento del cultivo (Jaramillo-Barrios *et al.*, 2019).

Los daños de *S. frugiperda* en maíz pueden variar de acuerdo al estado fenológico del cultivo y serán más graves si el ataque se produce en plantas jóvenes. El daño ocasionado durante los primeros días de desarrollo de la planta puede ser de dos tipos, cortando la planta cerca del suelo o defoliándola parcial o totalmente, mientras que cuando el cultivo va creciendo, el daño se realiza en el cogollo, produciendo perforaciones en las hojas (Casmuz *et al.*, 2010). Durante la fase vegetativa del maíz, debido a la constante alimentación de las larvas, se produce la esqueletización de las hojas y la presencia de ventanas grandes y el abundante excremento larval (Goergen *et al.*, 2016).

La capacidad de completar el ciclo de vida para los insectos representa una adaptación exitosa tanto a su planta huésped como al entorno climático en el que se encuentran. El conocimiento de los factores ambientales que se requieren para que una especie complete su ciclo de vida es fundamental para el pronóstico del rango potencial de distribución (Early *et al.*, 2018).

Entre los factores ambientales que afectan el ciclo de vida de la especie plaga *S. frugiperda* destaca la temperatura. Al respecto, Wang *et al.*, (2019) señala que la temperatura es el principal factor ambiental que afecta el crecimiento, la reproducción y la distribución de *S. frugiperda*. Esta especie está adaptada a las partes más cálidas del Nuevo Mundo y su temperatura óptima para el desarrollo larvario es de 28 ° C, pero es más baja tanto para la oviposición como para la pupación; a temperaturas más bajas, la actividad y el desarrollo cesan, y cuando ocurre la congelación, todas las etapas generalmente mueren. (CABI, 2020).

La temperatura puede actuar directamente sobre un insecto como factor de mortalidad o determinando la tasa de crecimiento y desarrollo, de modo que con el conocimiento de los efectos de temperatura elevada en insectos y el entendimiento de las estrategias de historia de vida de insectos y plantas, se pueden generar hipótesis sobre las respuestas a los distintos escenarios de cambio climático (Bale *et al.*, 2002).

Se ha sustentado que la Tierra ha experimentado ciclos de cambio de temperatura y precipitación a escala geológica. Las temperaturas de la superficie global han

aumentado en aproximadamente 0.3 a 0.6 ° C desde fines del siglo XIX, y en aproximadamente 0.2 a 0.3 ° C durante el período 1950-1990 (Houghton *et al.*, 1996). Los cambios en la temperatura y la precipitación afectan la supervivencia, reproducción, dispersión y distribución de herbívoros y patógenos (Dale *et al.*, 2001).

El cambio climático y sus posibles efectos en insectos ha sido un tema bastante documentado (Cornelissen, 2011; Chen *et al.*, 2011; Deutsch *et al.*, 2018; Jaworski y. Hilszczański, 2013; Ramírez-Cabral *et al.*, 2017). Las altas concentraciones de CO₂ y O₃, además de la temperatura elevada y cambios en los patrones de lluvia pueden afectar las interacciones entre insectos y sus plantas hospederas. Debido a su estrecha relación con la planta huésped, se espera que los insectos fitófagos puedan sufrir los efectos directos e indirectos del cambio climático a través de los cambios sufridos por sus plantas hospederas, con consecuencias para la dinámica de población, la estructura de la comunidad y el funcionamiento del ecosistema (Cornelissen, 2011). Sin embargo, los efectos del cambio climático en los insectos son difíciles de proyectar debido a las complejas interacciones entre insectos, huéspedes y depredadores (Ramírez-Cabral *et al.*, 2017).

Los modelos climáticos suponen pérdidas de producción de cultivos debido a las plagas con el aumento de la temperatura. Al respecto, Deutsch *et al.*, (2018) señalan que cuando las temperaturas globales de la superficie del suelo aumentan en 2°C, el aumento medio en las pérdidas de rendimiento por presión de las plagas en maíz puede ser de 31%, con un total estimado de pérdidas de 62 megatonnes métricos por año. Estos autores además prevén que las pérdidas de rendimiento global en maíz, arroz y trigo aumenten entre un 10 y un 25% por grado de calentamiento medio global de la superficie.

Rosenzweig *et al.*, (2014) indican fuertes efectos negativos del cambio climático, especialmente a niveles más altos de calentamiento y en latitudes bajas donde se concentran los países en desarrollo. Estos autores en su multimodelo proyectan para las décadas 2020 - 2080 pérdidas en la producción del maíz que pueden alcanzar hasta el 40%. A partir de la década de 2080, los impactos negativos en el rendimiento en los trópicos son muy probables, independientemente del escenario

de adaptación o emisión, con 3 ° C del calentamiento local o incluso con los beneficios de un mayor CO₂ y lluvia (Porter *et al.*, 2014).

Los modelos climáticos estiman un rango en la sensibilidad climática de 1.5 a 4.5 ° C y proyectan que para el 2100 habrá un aumento en la temperatura media global de entre 0.9 y 3.5 ° C y todos los escenarios muestran un calentamiento climático sustancial debido a los gases de efecto invernadero (Houghton *et al.*, 1996). En cuanto al impacto del calentamiento global en la agricultura, los modelos que evalúan este efecto rara vez consideran las pérdidas de cultivos para los insectos (Deutsch *et al.*, 2018). Es por ello que estos autores consideran la necesidad de utilizar relaciones establecidas entre la temperatura y el crecimiento de la población y las tasas metabólicas de los insectos para estimar cómo y dónde el calentamiento climático aumentará las pérdidas del cultivo debidas a los insectos.

Con base en estos argumentos, la validación de modelos para evaluar la interacción entre los factores climáticos y el daño ocasionado por las plagas, particularmente para cada región, constituye un elemento de inclusión en el manejo integrado de cualquier insecto plaga. El conocimiento de los posibles daños que pueda ocasionar una plaga en un cultivo en el futuro, representa un requisito indispensable para diseñar las medidas necesarias para su protección.

Objetivo general

Diseñar un modelo predictivo sobre el impacto del cambio climático en la cantidad de larvas de *Spodoptera frugiperda* Smith en el cultivo de maíz (*Zea mays*) en la provincia de Tungurahua.

Objetivos específicos

- Determinar el efecto de la temperatura y humedad relativa sobre los aspectos biológicos de *S. frugiperda* en el cultivo del maíz (*Zea mays*).
- Evaluar con estudios de laboratorio la relación entre los parámetros climáticos y la cantidad de *S. frugiperda* en el cultivo del maíz (*Zea mays*).
- Diseñar un modelo de simulación fenológica de *S. frugiperda* y mapas de riesgo basados en los parámetros bioecológicos de la plaga.

2. CAPÍTULO II

2.1. Estado del arte

2.1.1. Aspectos bioecológicos de *S. frugiperda* y su importancia en el cultivo de maíz

S. frugiperda es una de las plagas invasivas más importantes de América, capaz de causar daño en numerosos cultivos. Para esta especie se han identificado al menos dos biotipos que presentan variación genética asociada con la planta hospedera, uno que se alimenta de maíz y otro que se alimenta de arroz y pasto bermuda, *Cynodon dactylon* (L.) (Pashley, 1986). El biotipo de maíz también ha sido reportado infestando sorgo, algodón; mientras que el biotipo de arroz se ha encontrado también en caña de azúcar, pasto Jonhson, *Sorghum halepense* (L.) y pasto bermuda (Juárez *et al.*, 2012). Ambos biotipos de *S. frugiperda*, son atraídos por las plantas de maíz. Sin embargo, se ha demostrado que las larvas pertenecientes al biotipo de maíz muestran una preferencia más fuerte y específica por el maíz (Pashley *et al.*, 1995; Meagher *et al.*, 2004).

El gusano cogollero es una plaga económica significativa en el hemisferio occidental, que causa pérdidas sustanciales en maíz, sorgo, forraje y pastos e infesta la mayor parte del centro y este de los Estados Unidos y Canadá, debido a las migraciones anuales desde los sitios de hibernación en Florida y Texas (Nagoshi y Meagher, 2008). Según Nagoshi *et al.*, (2018), se esperan daños significativos en el rendimiento de los cultivos de maíz africano y una alta probabilidad de una mayor dispersión, lo que pone en riesgo al resto del hemisferio oriental.

Las dos cepas de *S. frugiperda* están presentes en África y se están extendiendo rápidamente por las regiones tropicales y subtropicales del continente (Day *et al.*, 2017). En Zimbabwe se han estimado niveles de daño ocasionado por el gusano cogollero entre 26.4–41.5% (Baudron *et al.*, 2019). En Ghana, en un estudio sobre evaluación de daños causados por *S. frugiperda* en maíz (Nboyine *et al.*, 2019), se demostró que los cambios en la abundancia de este insecto en el maíz están influenciados por la etapa de crecimiento del cultivo, la lluvia y la humedad relativa

y además estos dos últimos factores contribuyen positivamente a la abundancia de la plaga.

Los daños causados por *S. frugiperda* en el cultivo de maíz en América, pueden alcanzar niveles de importancia económica. Se han reportado pérdidas sostenidas en el rendimiento del maíz en Estados Unidos de 17%, cuando las plantas están inicialmente infestadas con masas de huevos de cogollero entre 20-100% (Cruz y Turpin 1983). En Nicaragua, se han indicado pérdidas de rendimiento que pueden alcanzar 73% cuando la infestación inicial con *S. frugiperda* es alta (Hruska y Gould 1997). Por su parte, Ayala *et al.*, (2013) reportaron en Argentina niveles de daño que llegan a 55%, cuando evaluaron los daños de las larvas de *S. frugiperda* durante la etapa de crecimiento del cultivo de maíz.

El maíz es el cereal preferido en el sur y en el oriente de África, en Centroamérica y México (Ranum *et al.*, 2014). Además, el maíz es el cereal de tierras altas más ampliamente cultivado en el mundo y es el cultivo alimentario básico principal en muchos países en desarrollo (Ram *et al.*, 2017). De ahí que, el control *S. frugiperda* se convierta en un factor crucial para la garantía de la productividad del cultivo y en consecuencia para la seguridad alimentaria en el mundo.

La fluctuación poblacional de una plaga sucede como respuesta a la influencia de los factores ambientales. El grado de influencia de varios factores ambientales determinará la magnitud del incremento o disminución de la plaga (Rahmathulla *et al.*, 2015). Es necesario conocer los factores que influyen en la distribución y abundancia de un insecto y sobre todo para el caso de insectos que causan daño económico (Baskauf 2003). En consecuencia, el conocimiento de la biología y ecología de un insecto plaga constituye una herramienta necesaria para el diseño de modelos que pronostiquen sus daños potenciales y a su vez, estos modelos funcionalmente viables serán requeridos para los programas que pretendan su control.

El gusano cogollero ha sido considerado una de las peores plagas agrícolas del mundo. Knipling (1980) concluyó que es una plaga de difícil control debido a su amplio rango de hospederos y su extensa distribución durante la estación de

crecimiento del cultivo, además de su rápido y largo rango de movimiento que probablemente le provee mecanismos de escape de la acción de ciertos enemigos naturales.

Debido a la importancia de *S. frugiperda*, se han desarrollado numerosos estudios relacionados con la biología de esta plaga en diferentes hospederos. Barfield y Ashley (1987) estudiaron bajo condiciones de laboratorio, el efecto del maíz, la fenología del cultivo y la temperatura en el tiempo de desarrollo, y otros parámetros biológicos en el gusano cogollero. Estos autores determinaron que el tiempo de desarrollo fue afectado por la temperatura y la etapa de consumo de maíz, registrando valores promedio de 34,1; 27,5 y 19,8 días en el tiempo de desarrollo desde huevo hasta el adulto a temperaturas de 21, 25 y 30 °C, respectivamente, durante la primera etapa del cultivo del maíz. Los autores también indicaron que las larvas requieren entre 6 o 7 instares para completar su desarrollo y que la proporción de larvas que ingresan a un séptimo estadio tiende a aumentar para las larvas que se alimentan en las etapas posteriores del maíz.

Castro y Pitre (1988) en su estudio sobre el desarrollo de poblaciones de *S. frugiperda* provenientes de dos regiones distintas (Missisipi y Honduras) y alimentados en laboratorio con sorgo y maíz, a 26-27°C y 14 horas de luz, concluyeron que el tiempo de desarrollo de las larvas del gusano cogollero fue más corto cuando provino de Missisipi que de Honduras. Estos autores también señalaron que la longevidad de los adultos del cogollero en maíz de Missisipi fue mayor cuando se alimentaron con maíz que con el sorgo y que las diferencias obtenidas en las características biológicas sugieren que las poblaciones de *S. frugiperda* del sur de Honduras y Missisipi son diferentes.

Barros *et al.*, (2010) estudiaron el desarrollo de *S. frugiperda* en cuatro hospederos, soya, maíz, millo y arroz; encontrando que en valores promedio de 27°C de temperatura y 84% de humedad relativa, la sobrevivencia de las larvas en maíz fue de 24,3%. Estos autores señalaron que, aunque se ha reportado que las larvas del cogollero prefieren alimentarse de hojas de maíz en lugar de otras plantas hospederas, ellos encontraron una supervivencia larval más baja y un aumento de peso 44% menor para las larvas criadas en el maíz en comparación con las larvas

criadas en millo bajo condiciones de campo, lo que puede indicar una posible competencia entre las larvas criadas en plantas de maíz.

Mello *et al.*, (2016) estudiaron el desarrollo de *S. frugiperda* utilizando diferentes fuentes de alimentos (soya, algodón, maíz, trigo, *Triticum aestivum* L. y avena, *Avena sativa* L.) en ensayos de laboratorio y campo. Estos autores destacan entre sus resultados un tiempo de desarrollo larva-adulto más corto en las larvas que se alimentaron de trigo, avena y maíz que las alimentadas con hojas de algodón y soya. En cuanto a la supervivencia larva-adulta y la proporción de sexos, estos autores no encontraron diferencias significativas entre las plantas hospederas. Las especies de gramíneas evaluadas en este estudio, de acuerdo a los autores, fueron los hospederos más adecuados para el crecimiento de *S. frugiperda*.

Sharanabasappa *et al.*, (2018) estudiaron la historia de vida del gusano cogollero en condiciones de laboratorio ($26\pm 2^{\circ}\text{C}$, 75-80% RH y 12:12 de fotoperiodo), obteniendo que el tiempo promedio de duración del ciclo biológico de *S. frugiperda* fue de 32-43 y 34-46 días, para los machos y hembras, respectivamente. Estos autores también determinaron los períodos de pre-oviposición, oviposición y post-oviposición, los cuales variaron de 3-4, 2-3 y 4-5 días, respectivamente; y el promedio de la longevidad fue de 10,80 para las hembras y 8,20 para los machos.

Recientemente, Sokame *et al.*, (2020) estudiaron la influencia de la temperatura en las interacciones larvales intra e interespecíficas para la utilización de recursos entre *S. frugiperda* y una comunidad de larvas de barrenadores lepidópteros en maíz. Estos autores utilizaron tallos artificiales mantenidos a diferentes temperaturas constantes (15, 20, 25 y 30°C) y determinaron el efecto que se producía en las tasas de crecimiento relativo y de supervivencia relativa de cada especie en especies individuales y multiespecíficas. Entre los resultados de este estudio se señala que, igual que a los barrenadores de lepidópteros, la temperatura también afectó las tasas de supervivencia y de crecimiento relativo de *S. frugiperda*, y además la competencia es generalmente débil en el segundo instar larval, pero *S. frugiperda* puede coexistir con especies de barrenadores a lo largo de todo el gradiente de temperatura y aumentar las limitaciones de producción de los cultivos de cereales.

En cuanto a la ecología de *S. frugiperda*, cabe destacar que uno de los parámetros más estudiados en esta plaga ha sido la fluctuación poblacional. Wyckhuys y O'Neil (2006) en su estudio sobre la dinámica poblacional de *S. frugiperda* en maíz, destacaron que la infestación del gusano cogollero generalmente se mantuvo por debajo del 30-40%. Sin embargo, la plaga presentó una elevación de la infestación durante la etapa de crecimiento vegetativo del cultivo. Estos autores también confirmaron la influencia negativa de la altitud en la infestación del gusano cogollero durante los dos años del estudio, en los que los campos más altos estuvieron caracterizados por niveles más bajos de infestación.

Murúa *et al.*, (2006) en sus estudios sobre la dinámica poblacional de *S. frugiperda* en Argentina, reportaron que las infestaciones del gusano cogollero mostraron una respuesta dependiente de la edad de la planta en las localidades estudiadas y la reducción del número medio de larvas se relacionó con la edad y el desarrollo de la planta, encontrándose la mayor cantidad de larvas durante las primeras etapas de desarrollo del cultivo. Entre las conclusiones de este estudio se señala que, la temperatura y la precipitación fueron los factores climatológicos que afectaron significativamente la abundancia de la plaga y que el canibalismo larval, la mortalidad larval por enfermedad o depredadores y la edad larval son factores que pueden influir en la distribución de *S. frugiperda*.

También se han propuesto modelos para estimar la dinámica poblacional de *S. frugiperda* en el cultivo de maíz. Al respecto, García *et al.*, (2018) desarrollaron un modelo individual que describe la dinámica de *S. frugiperda* en función de sus requisitos térmicos (grados-días acumulativos para el desarrollo de insectos) y la viabilidad controlada por la temperatura, incluyendo también la composición y la disposición espacial del cultivo, el movimiento de los adultos y las larvas entre otros factores. Entre sus conclusiones, estos autores destacan que, el modelo propuesto puede constituir una herramienta importante para los programas integrados de manejo de plagas, ya que puede usarse para predecir tanto los efectos de la implementación de un nuevo enfoque para el control de plagas como la influencia del calentamiento global en la dinámica de los insectos.

2.1.2. Modelos predictivos en la distribución de plagas

Los factores climáticos, especialmente la temperatura, afectan directamente la supervivencia, el desarrollo, la reproducción y el movimiento de los insectos individuales y, en consecuencia, pueden alterar la distribución potencial y abundancia de una especie plaga particular (Porter *et al.*, 1991; Camell y Knight, 1992). La temperatura impacta tanto los fenotipos como las distribuciones de los organismos, lo que a su vez puede ejercer presión selectiva sobre el comportamiento, la fisiología y la historia de vida cuando las temperaturas ambientales varían en espacio y tiempo (Angilletta, 2009).

En regiones templadas, la distribución y supervivencia de muchas plagas a menudo está limitada por bajas temperaturas y particularmente por las condiciones frías que ocurren en invierno, pero las condiciones más cálidas pueden aumentar la importancia de algunas plagas existentes y también conducir a la aparición de nuevas plagas que fueron previamente restringidas por las bajas temperaturas desfavorables (Camell y Knight, 1992).

Las temperaturas globales de la tierra y los océanos han aumentado desde la revolución industrial, y las crecientes concentraciones de gases de efecto invernadero influyen en el calentamiento global (IPPC, 2007). Adicionalmente, se ha señalado que este calentamiento global puede ir en aumento sin la necesidad de que aumenten las concentraciones de gases de efecto invernadero. Tal evento ha sido proyectado por Meehl *et al.*, (2005), quienes indican que, si las concentraciones de todos los gases de efecto invernadero y otros constituyentes atmosféricos en las simulaciones se mantienen fijos en los valores del año 2100, se produciría un calentamiento adicional para el año 2200 de aproximadamente 0.1- a 0.3-C; esto relacionado con el hecho de que las concentraciones de CO₂ pueden comenzar a estabilizarse en el escenario establecido para el año 2050.

La temperatura y la humedad pueden influir en los insectos de forma directa, en la estimulación o limitación de la actividad de larvas y adultos, en la dispersión de insectos en el medio ambiente, en la fenología y longitud de crecimiento, o indirectamente, a través de la influencia del clima en el ambiente donde están los insectos (Jaworsky y Hilszczański, 2013). Debido a que la fisiología de los insectos es sensible a los umbrales críticos de temperatura y a que los cambios de rango de

cientos de kilómetros pueden tener grandes consecuencias económicas, las variaciones en la respuesta del clima a concentraciones elevadas de gases de efecto invernadero podrían generar el impacto neto del cambio climático en las plagas agrícolas (Diffenbaug *et al.*, 2008).

De acuerdo a Porter *et al.*, (1991), en vista de que el cambio climático puede afectar la distribución de los insectos, entonces en las regiones de latitudes medias, los aumentos de temperatura asociados con los cambios climáticos podrían resultar en lo siguiente: extensión del rango geográfico; aumento de la hibernación; cambios en las tasas de crecimiento de la población; mayor número de generaciones; extensión de la etapa de desarrollo; mayor riesgo de invasión de plagas migratorias y la introducción de hospederos alternativos o de hibernación.

En cuanto a las plagas invasivas y su control, la correspondiente planificación así como optimización de las estrategias en su búsqueda es un factor relevante (Baxter y Possingham, 2011). Para predecir la propagación de una plaga se recurre inicialmente a un modelo de distribución y la probabilidad de ocurrencia de la especie para obtener un patrón de búsqueda estratégica dentro de una región (Hauser y McCarthy 2009).

La información sobre la distribución de las especies no se ha integrado y no está fácilmente disponible y pese al esfuerzo de disponer con acceso digital a puntos de registro, mapas e información cartográfica sobre la ocurrencia de especies, no existe ningún servicio que pueda proporcionar toda la información disponible sobre distribuciones de especies y su integración basada en modelos, lo que justifica el diseño de herramientas digitales que faciliten la información integrada sobre los registros y proyecciones de la presencia de las especies en una región particular (Jetz *et al.*, 2012).

Es clara la influencia de los elementos climáticos en los insectos. Esto, junto al hecho de que algunas especies, por la naturaleza de sus hábitos y hábitats, pueden ser particularmente sensibles al cambio ambiental (Cannon, 1998), y que las consecuencias del cambio en el clima pueden alterar la dinámica poblacional y el status de los insectos plaga en la agricultura (Camell y Knight, 1992), se han

desarrollado numerosos modelos que tienden a predecir el comportamiento de la plaga bajo los distintos escenarios del cambio climático.

Diffenbaugh *et al.*, (2008) utilizaron estimaciones generadas empíricamente de los umbrales de hibernación de plagas y los requisitos de grados-día, junto con las proyecciones de cambio climático de un modelo climático de alta resolución, para proyectar posibles rangos futuros en cuatro plagas de maíz en Estados Unidos. Para todas las plagas estudiadas, el rango potencial fue mayor en el clima futuro que en el clima de referencia y el mayor cambio en el rango potencial se observó en la plaga cosmopolita, *Helicoverpa zea* (Boddie).

Hauser y McCarthy, (2009) desarrollaron un modelo para la detección y gestión de una especie invasora de baja densidad, distribuida en un paisaje con diferentes probabilidades de ocurrencia y detección, y diferentes beneficios de detección, determinando también la asignación de recursos que minimiza los costos de manejo esperados, con y sin un presupuesto de vigilancia.

Las técnicas usadas para la predicción de insectos se basan en la identificación de aquellas áreas que tengan mayor probabilidad de presentar insectos, por lo que estos modelos de predicción representan una ayuda importante cuando los recursos disponibles para el muestreo son escasos (Di Nucci *et al.*, 2017). La disponibilidad de redes satelitales y estaciones meteorológicas facilita el registro de datos meteorológicos; además hay gran capacidad de almacenamiento y cálculo mediante las tecnologías computacionales, lo que permite formular y evaluar modelos para predecir el desarrollo del cultivo, así como el de sus plagas y enfermedades en función de variables meteorológicas (Valdez-Torres *et al.*, 2012).

Los modelos de predicción de insectos pueden ser clasificados en dos grupos, basándose en la información que ellos proporcionan para discriminar entre los códigos “infestado” o “limpio”, ubicando en el primer grupo las técnicas que consideran el producto medido, ejemplo el tamaño, y en el segundo grupo se ubican las técnicas centradas en el proceso de medición, ejemplo los aspectos relacionados con el proceso (Di Nucci *et al.*, 2017).

Los modelos son herramientas útiles para sintetizar la información y establecer hipótesis, su aplicación debe estar en el contexto del sistema de gestión en el que será aplicado, por lo que debe considerar las características ecológicas y socioeconómicas bajo las cuales opera el modelo, lo cual será útil para la toma de decisiones para el manejo de plagas (Tonnang *et al.*, 2017). Estos autores también señalan que la utilidad de los modelos se refleja al responder las siguientes interrogantes: a) ¿Cómo se puede predecir la dinámica de la población de plagas en presencia de múltiples factores? b) ¿Cómo influyen los factores bióticos y abióticos las interacciones entre las plagas y sus enemigos naturales? c) ¿Cómo se puede medir y predecir en áreas amplias el impacto de los enemigos naturales sobre las poblaciones de la plaga? d) ¿Cómo se pueden describir los patrones de propagación de la plaga y los máximos de invasión hacia otras áreas? y e) ¿Se pueden desarrollar modelos para calcular y predecir cambios relacionados con insectos plaga adaptados al cambio climático y sobreviviendo en nuevas condiciones ambientales?.

El manejo de plagas agrícolas puede variar en gran medida en proporción a la variación climática futura, y por lo tanto, comprender y cuantificar los posibles impactos de *S. frugiperda* en tales condiciones climáticas es esencial para el futuro de la producción económica de los cultivos (Ramírez-Cabral *et al.*, 2017). Los modelos de predicción pueden constituir una herramienta importante para los programas integrados del manejo del gusano cogollero, ya que pueden predecir tanto los efectos de la implementación de un nuevo enfoque para el control de plagas como la influencia del calentamiento global en su dinámica poblacional, además pueden advertir sobre los efectos de un aumento gradual de las temperaturas medias en la densidad del gusano cogollero en el campo (García *et al.*, 2018).

Considerando la importancia de los modelos predictivos en los programas de manejo de las plagas y que *S. frugiperda* es una plaga que produce daños importantes en la agricultura en el mundo, se han desarrollado varios modelos que consideran esta plaga y su distribución bajo el impacto del cambio climático.

Valdez-Torres *et al.*, (2012) desarrollaron y evaluaron modelos fenológicos para maíz blanco y gusano cogollero con el propósito de favorecer el establecimiento de

estrategias de prevención del daño en el cultivo. Estos autores en sus experimentos usaron una cámara bioclimática para determinar las temperaturas umbrales en cada etapa de desarrollo del gusano cogollero, ajustaron polinomios de segundo grado para la tasa de desarrollo en función de la temperatura y determinaron matemáticamente las temperaturas umbrales mínima y máxima en 8.7 y 39.8 °C, respectivamente. En este estudio, el requerimiento térmico para el ciclo biológico del gusano cogollero fue 504 °DA, mientras que el requerimiento térmico del cultivo de maíz de siembra-madurez fisiológica fue 1454 °DA. El modelo estimado para gusano cogollero, en °DA, fue: $Etapa = 0.194 + 0.133 \text{ } ^\circ\text{DA} - 0.000433 \text{ } ^\circ\text{DA}^2 + 0.00000057 \text{ } ^\circ\text{DA}^3$ ($R^2 = 0.996$). Los modelos estimados en esta investigación tanto para el cultivo como para la plaga se pueden usar en forma conjunta para pronosticar los puntos de riesgos del cultivo en función del desarrollo fenológico y requerimientos térmicos.

Schmidt-Durán *et al.*, (2014) desarrollaron un modelo de predicción del estado larval en *S. frugiperda* colectado en higo (*Ficus carica* L.). Estos autores utilizaron un sistema lineal de ecuaciones y evaluaron regresiones no lineales para establecer un modelo de predicción para el tamaño de las larvas. De acuerdo a los autores, la ecuación de regresión cuadrática, $Size = 1,916 + 0,5970 \text{ fase} + 0,8323 \text{ fase}^{**2}$, fue la de mayor ajuste para el modelo, debido al menor promedio de error y la más baja desviación estándar con respecto a las otras regresiones.

Con respecto al hábito de migración presente en *S. frugiperda*, también se han realizado estudios basados en modelos climáticos. Westbrook *et al.*, (2015) desarrollaron un modelo estacional de migración del gusano cogollero, tomando en cuenta el desarrollo fenológico de las plantas hospedadoras de maíz, las poblaciones de *S. frugiperda* y su migración estacional en Estados Unidos. Entre sus conclusiones, estos autores señalaron que se identificaron dos poblaciones distintas de gusano cogollero de las regiones de cría de invierno en el sur de Texas y el sur de Florida como fuentes originales de vuelos de migración estacional de la plaga; los sucesivos vuelos migratorios nocturnos de la población de Texas se extendieron hacia el norte en las planicies altas del centro de EEUU y la población de Florida se extendió hacia el norte sobre los estados de Pensilvania y el Atlántico Medio. Se

identificaron regiones de mezcla de las poblaciones de Texas y Florida en la región sur de Alabama y Georgia y la región noreste de los estados de Pensilvania y el Atlántico Medio. El modelo de migración evaluado también estimó significativamente la semana de la primera migración de las polillas de *S. frugiperda*.

Ramírez-Cabral *et al.*, (2017) evaluaron un modelo para determinar el impacto del cambio climático en los rangos de distribución de *S. frugiperda* en América, así como en el riesgo de daños ocasionados por la plaga en las condiciones actuales y futuras. Los autores utilizaron el programa CLIMEX y datos biológicos obtenidos de la literatura y establecieron tres categorías de posibles números de generaciones (1-3, 3-5 y >5), que pueden producir tres niveles de riesgo (bajo, medio y alto). De acuerdo a los modelos evaluados en el estudio, se proyecta lo siguiente: aumentos en la categoría de bajo riesgo del 40% para 2050 y del 23% para 2100; la mayor parte del continente resulta adecuada en diferentes niveles para albergar las poblaciones del gusano cogollero; en América del Sur, es probable que se produzca una reducción en las áreas adecuadas para *S. frugiperda* en 2050, con una marcada reducción en 2100, principalmente en el norte, como en Brasil, Perú, Ecuador, Colombia, Venezuela, Guyana, Surinam y la Guayana Francesa; el noreste de Argentina, Uruguay, Paraguay y algunas partes del sur de Brasil seguirán siendo óptimamente adecuados para 2050 y se prevé que Uruguay, el noreste de Argentina y el sur de Brasil continúen teniendo una disponibilidad óptima para 2100.

García *et al.*, (2018) desarrollaron un modelo computacional para describir la dinámica de *S. frugiperda*, considerando la dinámica espacial del cultivo, los cambios de temperatura y la genética de la población, compararon los resultados con los datos de monitoreo de insectos y el modelo se ajustó satisfactoriamente con la dinámica de la población. Entre los resultados, estos autores señalaron que el modelo predijo satisfactoriamente el curso temporal de la población adulta de 2012 a 2015, en comparación con los datos obtenidos en el área monitoreada, y solo se observaron retrasos de sincronización de menos de 5 días, los cuales pudieron darse como respuesta a los intervalos de observación en los datos de campo.

La primera descripción genética del gusano cogollero que infesta el maíz en Ecuador fue realizada por Nagoshi *et al.*, (2019). Estos autores compararon sus resultados con las poblaciones de maíz en ubicaciones seleccionadas en el Caribe y América del Sur, para investigar la posible relación migratoria entre estas poblaciones y su asociación con respecto a los patrones de viento prevalecientes y la distribución de las localidades con clima favorable para el establecimiento y crecimiento de las poblaciones de *S. frugiperda*. Los autores destacaron que la ubicación de Ecuador es de particular interés en relación con las posibles rutas de migración intercontinental y los sistemas de transporte aéreo que probablemente están impulsando la migración del gusano del ejército en Sudamérica. Con respecto a las localidades evaluadas en el estudio, los autores indican que las poblaciones en Trinidad y Tobago podrían contribuir con las poblaciones del cogollero en Ecuador, lo que a su vez actuaría como fuente migratoria para Perú; sin embargo, los vientos estacionales en Ecuador durante los niveles altos de infestación de *S. frugiperda* fueron de baja velocidad y dirección inconsistente, condiciones que aumentan la posibilidad de que las poblaciones de gusanos del ejército caídas en Ecuador puedan estar relativamente aisladas del resto del continente.

La reciente investigación de Nagoshi *et al.*, (2019) además de aportar información genética sobre *S. frugiperda* en Ecuador, también contribuye con información sobre los posibles escenarios de migración de la plaga en Suramérica, aspectos que se detallan a continuación. Se reportan fuertes similitudes en la composición genética de las poblaciones de gusano cogollero de Ecuador, Perú, Bolivia y Trinidad y Tobago, lo que permite inferir que se trate de una mezcla extensa del gusano cogollero en estos cuatro países, mientras que la población de Puerto Rico parece estar aislada. Se explican las implicaciones en la determinación y prevención de la migración de la plaga, toda vez que Puerto Rico está a solo 100 km más lejos de Ecuador que Trinidad y Tobago, según las comparaciones de vuelo directo. A pesar de la capacidad del gusano cogollero para migrar miles de kilómetros por temporada en América del Norte, los aproximadamente 800 km de agua que separan a Puerto Rico del continente sudamericano (en comparación con solo 50 km para Trinidad y Tobago) son una barrera significativa para prevenir la migración regular de la plaga de un sitio a otro.

Baloch *et al.*, (2020) desarrollaron un modelo para predecir la distribución geográfica potencial de *S. frugiperda* en Asia Central, utilizando los registros de ocurrencia nativa y las variables ambientales. Estos autores señalaron el oeste de Afganistán, el sur de Kazajistán y el sur de Turkmenistán como las áreas de distribución potencial con alta probabilidad para albergar la plaga. En cuanto a los parámetros climáticos, estos autores indicaron que las mayores probabilidades de encontrar a *S. frugiperda* se produjeron bajo las siguientes condiciones: rango diurno 6 ° C, isothermalidad 33, temperatura máxima del mes más cálido 35 ° C, precipitación del mes más húmedo 45 mm, estacionalidad de la precipitación 0 y precipitación del trimestre más seco 180 mm.

2.1.3. Fundamentación filosófica

El maíz es uno de los productos alimenticios más consumidos en Latinoamérica, y particularmente, en Ecuador constituye uno de los principales granos, se siembra a gran escala y sostiene parte de la economía del país. Además, el maíz tiene gran significado para la población indígena de este país, al constituir parte de su identidad.

En cuanto al manejo del cultivo del maíz, las investigaciones recientes tienden a incluir la mayor cantidad de elementos intervinientes, presentando al cultivo como sistema. Uno de los factores que ha recibido especial atención es el clima y su influencia directa e indirecta sobre la productividad. El conocimiento del clima puede alertar sobre los eventos que favorecen tanto al cultivo como a sus plagas. En tal sentido, surge la necesidad de investigación que genere nuevas estrategias, bien sea para favorecer al cultivo o perjudicar a las plagas, de modo que, la predicción de eventos climáticos constituye un elemento de consideración para el manejo del cultivo.

En el Planeta ya se han dado cambios climáticos significativos, pero éstos han sucedido en forma natural. El problema es entender que estos cambios pueden suceder en menor tiempo y como consecuencia de la actividad humana. De allí, la preocupación de las instituciones por detectar el impacto de este cambio, el cual según las predicciones señaladas por la comunidad científica puede llegar a afectar

grandemente la economía mundial, toda vez que la agricultura sufriría uno de sus principales efectos.

2.1.4. Fundamentación legal

En la constitución de la República del Ecuador se establece la obligación del Estado de garantizar a los ciudadanos el “acceso seguro y permanente a alimentos sanos, suficientes y nutritivos”... “El Estado ecuatoriano promoverá la soberanía alimentaria”. *Art. 13, Sección primera, Capítulo segundo*. Así mismo, el Estado reconoce el derecho de sus ciudadanos a “vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, que garantice la sostenibilidad y el buen vivir, *sumak kawsay*”. *Art 14, Sección segunda, Capítulo segundo*.

De igual manera, en el *Art 281, Capítulo tercero*, también se reconoce la soberanía alimentaria, como “una obligación del Estado para garantizar que las personas, comunidades, pueblos y nacionalidades alcancen la autosuficiencia de alimentos sanos y culturalmente apropiados de forma permanente”. Y entre las responsabilidades que debe asumir el Estado para garantizar el cumplimiento de esta norma, en el *numeral 8* se refleja la importancia de la investigación científica: “Asegurar el desarrollo de la investigación científica y de la innovación tecnológica apropiadas para garantizar la soberanía alimentaria.

También será obligación del Estado fomentar la producción nacional para garantizar la soberanía alimentaria, por lo que debe “Desarrollar políticas de fomento a la producción nacional en todos los sectores, en especial para garantizar la soberanía alimentaria y la soberanía energética, generar empleo y valor agregado”. *Art. 334, Sección cuarta, Numeral 4*.

CAPÍTULO 3

3.1. Metodología

3.1.1. Enfoque

La presente investigación fue desarrollada bajo un enfoque cuantitativo en el cual la (s) hipótesis establecida es evaluada en función a las variables medibles o cuantificables, mediante un diseño experimental, analizado a través de un método estadístico (Hernández-Sampieri et al., 2010).

3.1.2. Modalidad básica de la investigación

Explicativa debido que intenta identificar la posible relación entre las variables climáticas y el daño de *S. frugiperda*.

Bibliográfica: Es una de las primeras etapas de la investigación donde se explora qué se ha escrito en la comunidad científica sobre la problemática planteada para el presente estudio, y servirá para comprobar con los resultados que se obtengan.

3.1.3. Nivel o tipo de investigación

El nivel de esta investigación es explicativo puesto que busca explicar, mediante análisis de regresión, las posibles relaciones entre las variables climáticas (temperatura, precipitación y humedad relativa) y el nivel de daño e incidencia de *S. frugiperda* en siembras de maíz.

3.2. Población y muestra

Población: fueron considerados datos climáticos (temperatura, Precipitación y humedad relativa) correspondientes a los años 2017, 2018 y 2019 de la zona sierra, así como los datos sobre porcentaje de daño e incidencia de *S. frugiperda* en plantas de maíz en las provincias de Azuay, Bolívar, Cañar, Chimborazo, Imbabura, Loja y Tungurahua (Datos provistos por el Ministerio del Ambiente).

Muestra: Del total de zonas muestreadas se consideraron 682 datos

Tratamientos: Dado que el estudio consistió en la evaluación de un análisis de regresión, los tratamientos estuvieron definidos por las variables a ser evaluadas. Así las variables consideradas fueron las siguientes:

- a) Variables independientes: variables climáticas: temperaturas, precipitación y humedad relativa
- b) Variables dependientes: el porcentaje de daño y nivel de incidencia de *S. frugiperda* en siembras de maíz

Una vez definidas las variables, se evaluó la relación entre los diferentes factores climáticos (temperatura, humedad y precipitación) y el nivel y severidad del daño causado por *S. frugiperda* con el fin de desarrollar un modelo predictivo que explique la posible influencia de los parámetros climáticos sobre el potencial daño de la plaga estudiada. Para ello, fueron analizadas bases de datos proporcionadas por Agrocalidad en el cual se disponían datos de muestreos de la plaga relacionados con porcentaje de daño y severidad en la zona Sierra. Además, se contó con datos históricos sobre los parámetros climatológicos proporcionados por el Ministerio del Ambiente.

Previo al análisis, fue generada una tabla dinámica donde fueron calculados los promedios del nivel de severidad e incidencia por mes y luego fueron incorporados los datos climáticos correspondientes a los años 2017, 2018 y 2019. Posteriormente fueron analizadas las variables severidad y la incidencia por separado. Dado que los datos de severidad e incidencia estaban expresados en valores porcentuales, estos fueron sometidos a una transformación angular para ser sometidos a análisis en ambiente R.

3.3. Análisis para la severidad

```
dat <- read.delim("clipboard",dec=","); attach(dat) #Adjuntar los datos
```

```
names(dat)
```

```
str(dat)
```

`tr<-asin(sqrt(Promedio.de...SEVERIDAD/100))#Generación de la variable respuesta transformada angularmente (tr)`

Posteriormente se validó la relación entre las variables, para lo cual se usa el comando para ver las posibles relaciones entre las variables:

`Pairs (tr~MediaT+HR+precipi,panel= panel.smooth)`

Posteriormente se realizó una regresión múltiple entre las variables climáticas y la variable respuesta (tr)

`m1=lm(tr~MediaT+HR+precipi)`

`anova (m1)`

Posteriormente fueron removidos los términos no significativos.

Al finalizar el análisis se encontró una correlación leve pero no significativa entre la temperatura y el porcentaje de severidad.

3.4. Análisis para la incidencia

Para este análisis se repite el mismo procedimiento descrito para la sección anterior y la variable respuesta fue designada como *tr1*.

`tr1=asin(sqrt (Promedio de....INCIDENCIA./100))`

Luego fueron evaluadas las posibles interacciones entre las variables climáticas y la variable respuesta.

En el gráfico se observa una tendencia positiva leve entre HR y tr1 así como entre la precipitación y tr1. Esta última correlación parece ser cuadrática por lo que se incluye en el modelo.

El primer modelo es:

`mi2 = lm(tr1~I(precipi^2) + precipi + MediaT + HR,data = dat)`

3.5. Análisis estadístico

El análisis de los datos fue realizado bajo un diseño completamente aleatorizado. Los datos fueron sometidos a análisis de regresión múltiple para determinar la relación entre las variables climáticas en conjunto con las variables relacionadas con la plaga (nivel de daño e incidencia). En vista de que no se comprobó una relación múltiple las variables climáticas, se procedió a hacer un análisis de regresión simple.

4. CAPÍTULO 4

4.1. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Relación entre la severidad de *S. frugiperda* y los parámetros climáticos evaluados

Los datos de porcentaje de severidad de daño causados por *S. frugiperda* en plantas de maíz fueron inicialmente analizados y transformados mediante conversión angular por la fórmula $y = \sin^{-1} \sqrt{(\text{porcentaje de severidad}/100)}$, y la nueva variable fue designada como tr1, según se muestra a continuación en la figura 1:

```
tr1=asin (sqrt (Promseveridad/100))
```

```
## [1] 0.3363036 0.3658797 0.3762372 0.2137561 0.3420406 0.4573679  
0.1740830
```

```
## [8] 0.4182938 0.5869271 0.3217506 0.3283592 0.3976994 0.3492560  
0.3469169
```

```
## [15] 0.3976994 0.3380653 0.2867566 0.2677633 0.2976324 0.3098954  
0.3889421
```

```
## [22] 0.1418971 0.2735853 0.2806160 0.3098954 0.2197083 0.2867566  
0.3217506
```

```
## [29] 0.2569846 0.3017097 0.3250692
```

Figura 1. Datos transformados de porcentaje de severidad del daño de *S. frugiperda*

Posteriormente se hizo un análisis gráfico exploratorio, para evaluar posibles interacciones entre las variables humedad relativa (HR), temperatura (TEMP) y precipitación (precip) con la variable severidad transformada (tr1) (Fig. 2).

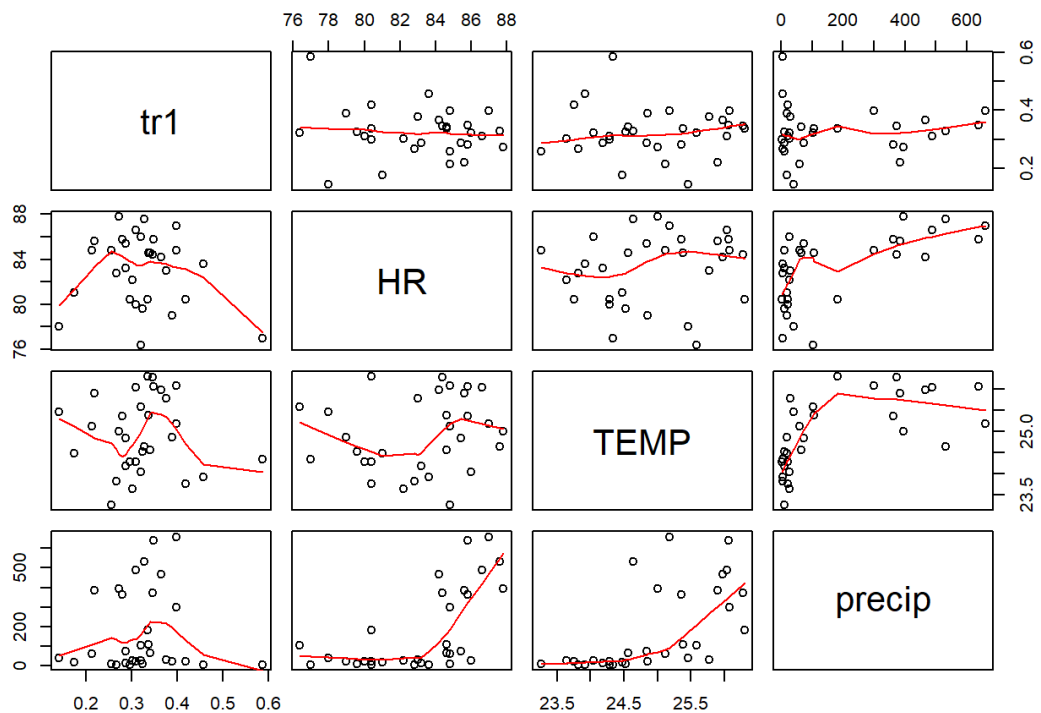


Figura 2. Análisis gráfico de las interacciones entre las variables climáticas y la severidad del daño causado por *S. frugiperda*.

De acuerdo con este gráfico, la variable tr1 (severidad de daño transformada) mostró una tendencia cuadrática con las variables climáticas, siendo más pronunciada con la humedad relativa y la temperatura, mientras que el efecto de la precipitación fue más leve. En consecuencia, se realizó una regresión múltiple, bajo la asunción de que la precipitación y la temperatura pueden tener una relación polinómica.

Análisis de datos

Names (dat)

```
[1] "Prom incidencia" "Prom severidad" "TEMP" "HR" "precip"
```

```
m1 = lm(tr1~poly(TEMP,3)+poly(HR,3)+poly(precip,3),data = dat)
```

Anova (m1).

Tabla 1. Análisis de varianza considerando las variables climáticas

Variable	Df	Sum Sq	Mean Sq	F	Pr(>F)
Poly (TEMP, 3)	3	0.019954	0.0066513	0.9148	0.4507
Poly (HR, 3)	3	0.027563	0.0091876	1.2637	0.3124
Poly (precip, 3)	3	0.012134	0.0040446	0.5563	0.6496
Residuals	21	0.152679	0.0072704		

Del análisis de regresión múltiple se observó que dado que los valores de p son mayores a 0,05 ($Pr>F$), indica que no hay una asociación múltiple significativa entre $tr1$ (severidad del daño) y las variables climáticas evaluadas cuando la relación es polinómica. Luego se evaluaron las relaciones cuadráticas y lineales, mediante la remoción de una variable a la vez.

```
names(dat)
```

```
## [1] "Promincidencia" "Promseveridad" "TEMP" "HR" "precip"
```

```
m2 = lm (tr1~poly (TEMP, 3) + poly (HR, 3) + poly (precip, 2), data = dat)
```

```
anova(m2).
```

Tabla 2. Análisis de varianza considerando todas las variables climáticas

Variable	Df	Sum Sq	Mean Sq	F	Pr(>F)
Poly (TEMP, 3)	3	0.019954	0.0066513	0.9583	0.4298
Poly (HR, 3)	3	0.027563	0.0091876	1.3238	0.2920
Poly (precip, 3)	3	0.012134	0.0060622	0.8735	0.4315
Residuals	22	0.152689	0.0069404		

```
anova(m2,m1)
```

```
Model 1: tr1 ~ poly (TEMP, 3) + poly (HR, 3) + poly (precip, 2)
```

```
Model 2: tr1 ~ poly (TEMP, 3) + poly (HR, 3) + poly (precip, 3)
```

Tabla 3. Análisis de varianza considerando todas las variables climáticas

Res.Df	RSS	Df	Sum of Sq	F	Pr (>F)
1		22	0.15269		
2	0.15268	1	9.4157e-06	0.0013	0.9716

Se realizó una comparación entre los dos modelos, se consideran que los modelos son iguales si el p-valor es mayor a 0,05, lo que demostraría que afecta significativamente remover los términos más complejos.

Este procedimiento se repite con todas las variables

$m3 = \text{lm}(\text{tr1} \sim \text{poly}(\text{TEMP}, 3) + \text{poly}(\text{HR}, 3) + \text{precip}, \text{data} = \text{dat})$

Anova (m3).

Tabla 4. Análisis de varianza considerando todas las variables climáticas

Variable	Df	Sum Sq	Mean Sq	F	Pr(>F)
Poly (TEMP, 3)	3	0.019954	0.0066513	0.9807	0.4191
Poly (HR, 3)	3	0.027563	0.0091876	1.3547	0.2814
Poly (precip, 3)	1	0.008827	0.0088266	1.3015	0.2657
Residuals	23	0.155986	0.0067820		

$m4 = \text{lm}(\text{tr1} \sim \text{poly}(\text{TEMP}, 2) + \text{poly}(\text{HR}, 3) + \text{precip}, \text{data} = \text{dat})$

Anova (m4).

Tabla 5. Análisis de varianza considerando las variables climáticas

Variable	Df	Sum Sq	Mean Sq	F	Pr(>F)
Poly (TEMP, 2)	2	0.001172	0.0005862	0.0759	0.9271
Poly (HR, 3)	3	0.013699	0.0045665	0.5912	0.6268
Precip	1	0.012076	0.0120761	1.5634	0.2232
Residuals	24	0.185382	0.0077242		

$m5 = \text{lm}(\text{tr1} \sim \text{TEMP} + \text{poly}(\text{HR}, 3) + \text{precip}, \text{data} = \text{dat})$

Anova (m5)

Response: tr1

Tabla 6. Análisis de varianza considerando las variables climáticas

Variable	Df	Sum Sq	Mean Sq	F	Pr(>F)
TEMP	1	0.000195	0.0001950	0.0263	0.8725
Poly (HR, 3)	3	0.012122	0.0040407	0.5446	0.6563
Precip	1	0.014535	0.0145349	1.9591	0.1739
Residuals	25	0.185478	0.0074191		

m6 = lm (tr1~TEMP + poly (HR, 2) + precip, data = dat)

Anova (m6)

Response: tr1

Tabla 7. Análisis de varianza considerando las variables climáticas

Variable	Df	Sum Sq	Mean Sq	F	Pr(>F)
TEMP	1	0.000195	0.0001950	0.0260	0.8732
Poly (HR, 2)	2	0.007724	0.0038621	0.5145	0.6038
Precip	1	0.009246	0.0092464	1.2318	0.2772
Residuals	26	0.195164	0.0075063		

m7 = lm (tr1~TEMP + HR + precip, data = dat)

Anova (m7)

Response: tr1

Tabla 8. Análisis de varianza considerando las variables climáticas

Variable	Df	Sum Sq	Mean Sq	F	Pr(>F)
TEMP	1	0.000195	0.0001950	0.0270	0.8707
HR	1	0.004119	0.0041194	0.5699	0.4568
Precip	1	0.012847	0.0128466	1.7772	0.1936
Residuals	27	0.195169	0.0072285		

M8 = lm (tr1~TEMP + HR + precip, data = dat)

Anova (m8)

Response: tr1

Tabla 9. Análisis de varianza considerando las variables climáticas

Variable	Df	Sum Sq	Mean Sq	F	Pr(>F)
TEMP	1	0.000195	0.0001950	0.0270	0.8707
HR	1	0.004119	0.0041194	0.5699	0.4568
Precip	1	0.012847	0.0128466	1.7772	0.1936
Residuals	27	0.195169	0.0072285		

M9 = lm (tr1~ precip, data = dat)

Anova (m9)

Response: tr1

Tabla 10. Análisis de varianza considerando las variables climáticas

Variable	Df	Sum Sq	Mean Sq	F	Pr(>F)
Precip	1	0.000596	0.0005962	0.0817	0.7771
Residuals	29	0.211733	0.0073012		

Anova (m9, m1) para comparar el modelo inicial con el final, se encuentra que no hay diferencias entre ambos.

Analysis of Variance Table

Modelo 1: tr1 ~ precip

Modelo 2: tr1 ~ poly (TEMP, 3) + poly (HR, 3) + poly (precip, 3)

Tabla 11. Análisis de varianza para la comparación de modelos

	ResDf	RSS	Df	Sum of Sq	F	Pr (>F)
1	29	0.21173				
2	21	0.15268	8	0.059054	1.0153	0.4546

Se encuentra que no hay diferencias entre ambos.

Se realiza el ploteo de validación del modelo, para ver si se cumplen los supuestos (Fig. 3).

Par (mfrow=c (2,2))

Plot (m9)

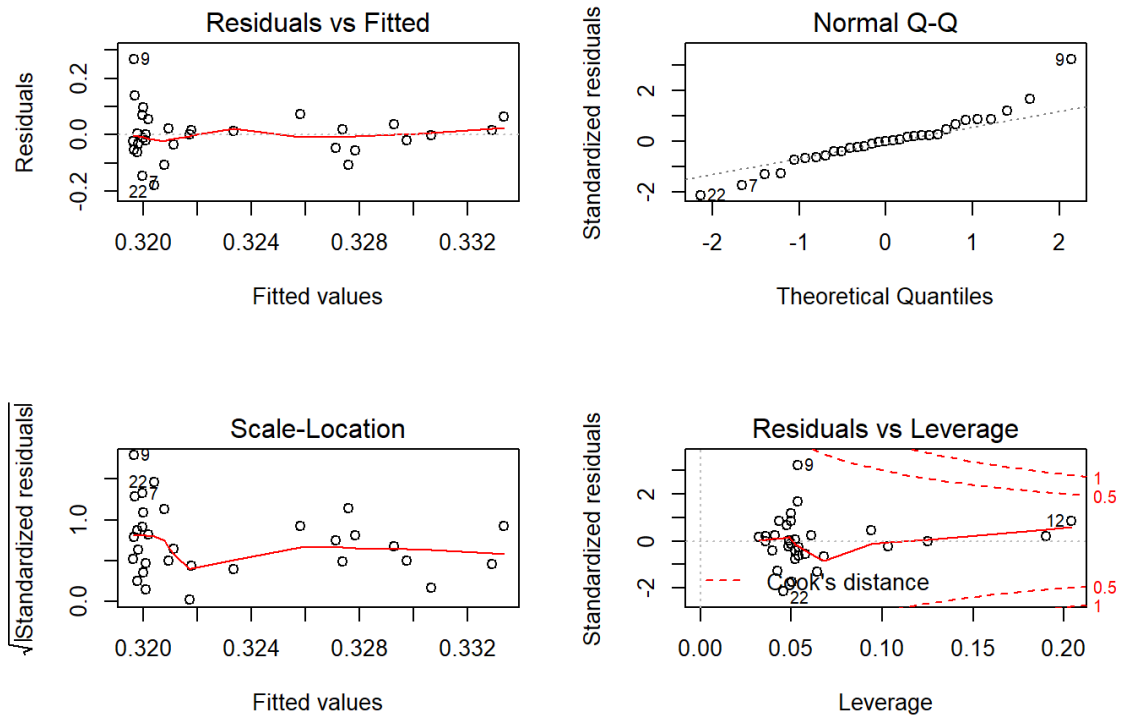


Figura 3. Comparación gráfica de los modelos

Par (mfrow = c (1,1))

No se encontró una relación entre la severidad y las variables evaluadas.

B. Relación entre la incidencia de *S. frugiperda* y los parámetros climáticos evaluados

Para esto se hizo el mismo procedimiento realizado para porcentaje de severidad, en este caso considerando la variable incidencia, la cual también fue previamente transformada por la fórmula $y = \sin^{-1} \sqrt{(\text{porcentaje de incidencia}/100)}$, resultando en la variable denominada *tr2* (Fig. 4).

```
tr2= asin (sqrt (Promincidencia/100))
## [1] 0.46377260 0.32671774 0.56403751 0.79789947 0.41491581 0.46439719
## [7] 0.14189705 0.44872847 0.63797124 0.03873952 0.32506923 0.32175055
## [13] 0.39503190 0.31400356 0.10016742 0.34863348 0.38349700 0.27416137
## [19] 0.21084319 0.28117921 0.38894206 0.10016742 0.19593041 0.38965403
## [25] 0.33031974 0.16413736 0.23540628 0.36227331 0.32341354 0.23999450
## [31] 0.24129063
```

Figura 4. Datos transformados de porcentaje de severidad del daño de *S. frugiperda*

De manera similar, se hizo un análisis gráfico exploratorio, para evaluar posibles interacciones.

Pairs (tr2~HR+TEMP+precip, panel= panel. smooth)

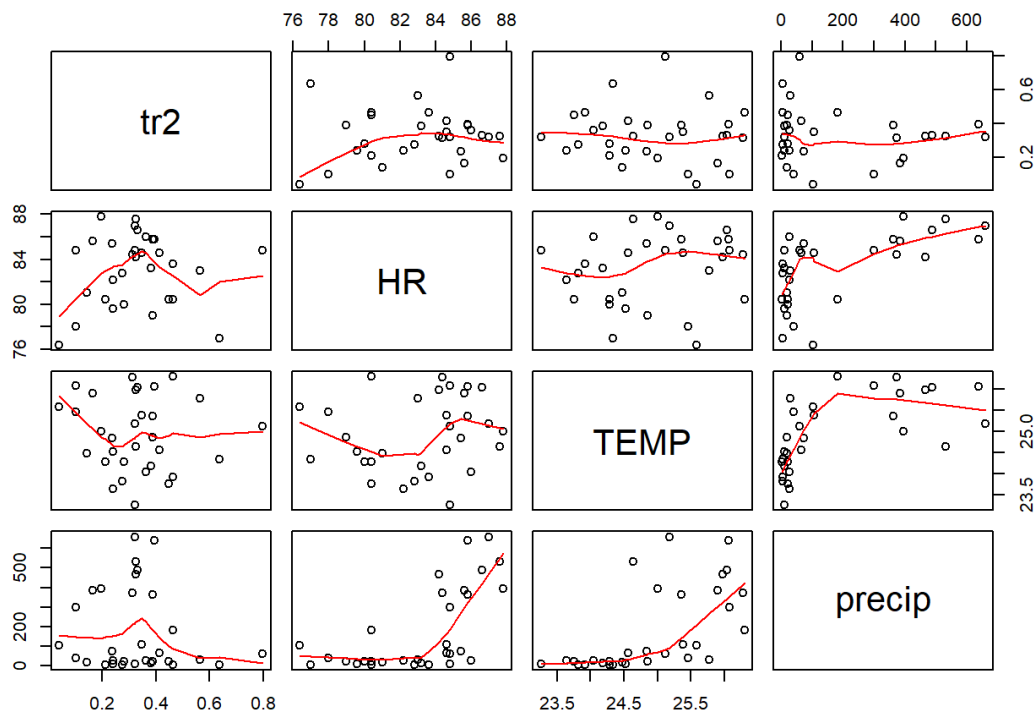


Figura 5. Análisis gráfico de las interacciones entre las variables climáticas y la incidencia de *S. frugiperda*.

Similar a lo observado con la variable severidad, la incidencia mostró una relación cuadrática con la humedad relativa con incrementos entre los niveles de humedad entre 78 y 84 %, pero con relación a la temperatura, la incidencia mostró una tendencia a disminuir con la disminución de la temperatura. Mientras que con la precipitación se observó una tendencia muy leve de incrementar con niveles de precipitación alrededor de los 200 mm/mes. Por lo tanto, se realizó una exploración de los datos.

Análisis de datos

Se realiza el análisis de regresión múltiple

```
[1] "Promincidencia" "Promseveridad" "TEMP" "HR" "precip"
```

```
m1 = lm (tr2~poly (TEMP,3) + poly (HR,3) + poly (precip,3), data = dat)
```

```
Anova (m1)
```

```
Variable respuesta: tr2
```


Tabla 12. Análisis de varianza considerando las variables climáticas

Variable	Df	Sum Sq	Mean Sq	F	Pr(>F)
poly(TEMP, 3)	3	0.01352	0.0045054	0.1545	0.9256
poly(HR, 3)	3	0.05254	.0175127	0.6006	0.6218
poly(precip, 3)	3	0.07930	0.0264328	0.9065	0.4546
Residuals	21	0.61234	0.0291591		

Se repitió el procedimiento anterior, removiendo los mayores valores de p de cada variable por separado.

```
names(dat)
```

```
[1] "Promincidencia" "Promseveridad" "TEMP" "HR" "precip"
```

```
m2 = lm (tr1~poly (TEMP, 2) + poly (HR, 3) + poly (precip, 3), data = dat)
```

Anova (m2) En este modelo se removió el mayor p-valor. El proceso se repitió y se comparó este modelo con al anterior.

Tabla 13. Análisis de varianza considerando las variables climáticas

Variable	Df	Sum Sq	Mean Sq	F	Pr(>F)
Poly (TEMP, 2)	2	0.001172	0.0005862	0.0704	0.9322
Poly (HR, 3)	3	0.013699	0.0045665	0.5487	0.5487
Poly (precip, 3)	3	0.014363	0.0047877	0.5753	0.6373
Residuals	22	0.183095	0.0083225		

```
m3 = lm (tr1~TEMP + poly (HR, 3) + poly (precip, 3), data = dat)
```

Anova (m3): en este modelo se removió el mayor p-valor, se repitió el proceso y se comparó este modelo con al anterior.

Tabla 14. Análisis de varianza considerando las variables climáticas

Variable	Df	Sum Sq	Mean Sq	F	Pr(>F)
TEMP	1	0.000195	0.0001950	0.0244	0.8771
Poly (HR, 3)	3	0.012122	0.0040407	0.5065	0.6817
Poly (precip, 3)	3	0.016519	0.0055065	0.6902	0.5673
Residuals	23	0.183493	0.0079780		

$m4 = \text{lm}(\text{tr1} \sim \text{poly}(\text{HR}, 3) + \text{poly}(\text{precip}, 3), \text{data} = \text{dat})$

Anova (m4): en este modelo se removió el mayor p-valor, se repitió el proceso y se comparó este modelo con al anterior.

Tabla 15. Análisis de varianza considerando las variables climáticas

Variable	Df	Sum Sq	Mean Sq	F	Pr(>F)
Poly (HR, 3)	3	0.011522	0.0038407	0.4977	0.6873
Poly (precip, 3)	3	0.015605	0.0052016	0.6741	0.5764
Residuals	24	0.185203	0.0077168		

$m5 = \text{lm}(\text{tr1} \sim \text{poly}(\text{HR}, 2) + \text{poly}(\text{precip}, 3), \text{data} = \text{dat})$

Anova (m5): en este modelo se removió el mayor p-valor, se repitió el proceso y se comparó este modelo con al anterior.

Tabla 16. Análisis de varianza considerando las variables climáticas

Variable	Df	Sum Sq	Mean Sq	F	Pr(>F)
Poly (HR, 2)	2	0.007706	0.0038529	0.4968	0.6144
Poly (precip, 3)	3	0.010735	0.0035783	0.4614	0.7117
Residuals	25	0.193889	0.0077556		

$m6 = \text{lm}(\text{tr1} \sim \text{poly}(\text{HR}, 2) + \text{poly}(\text{precip}, 2), \text{data} = \text{dat})$

Anova (m6): en este modelo se removió el mayor p-valor, se repitió el proceso y se comparó este modelo con al anterior.

Tabla 17. Análisis de varianza considerando las variables climáticas

Variable	Df	Sum Sq	Mean Sq	F	Pr(>F)
Poly (HR, 2)	2	0.007706	0.0038529	0.5152	0.6034
Poly (precip, 2)	2	0.010172	0.0050861	0.6801	0.5154
Residuals	26	0.194452	0.0074789		

m7 = lm (tr1~HR + poly (precip, 2), data = dat)

Anova (m7): en este modelo se removió el mayor p-valor, se repitió el proceso y se comparó este modelo con al anterior.

Tabla 18. Análisis de varianza considerando las variables climáticas

Variable	Df	Sum Sq	Mean Sq	F	Pr(>F)
Poly (precip, 2)	2	0.008317	0.0041586	0.5708	0.5715
Residuals	28	0.204013	0.0072862		

m8 = lm (tr1~poly (precip, 2), data = dat)

anova (m8): en este modelo se removió el mayor p-valor, se repitió el proceso y se comparó este modelo con al anterior.

Tabla 19. Análisis de varianza considerando las variables climáticas

Variable	Df	Sum Sq	Mean Sq	F	Pr(>F)
HR	1	0.004304	0.0043041	0.5963	0.4467
Poly (precip, 2)	2	0.013141	0.0065707	0.9103	0.4144
Residuals	26	0.194884	0.0072179		

m9 = lm(tr1~poly(precip), data = dat)

anova (m9): en este modelo se removió el mayor p-valor, se repitió el proceso y se comparó este modelo con al anterior.

Tabla 20. Análisis de varianza considerando las variables climáticas

Variable	Df	Sum Sq	Mean Sq	F	Pr(>F)
Poly (precip)	1	0.000596	0.0005962	0.0817	0.7771
Residuals	29	0.211733	0.0073012		

Anova (m9, m1): se compararon los dos modelos.

Warning in anova.lm (object, ...): models with response "tr2" removed because response differs from model 1.

Tabla 21. Análisis de varianza para la comparación de los modelos

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F	Pr (>5)
poly (precip)	1	0.000596	0.0005962	0.0817	0.7771
Residuals	29	0.211733	0.0073012		

Luego se realizó la validación del modelo, para verificar el cumplimiento de los supuestos.

Par (mfrow=c (2,2))

Plot (m9)

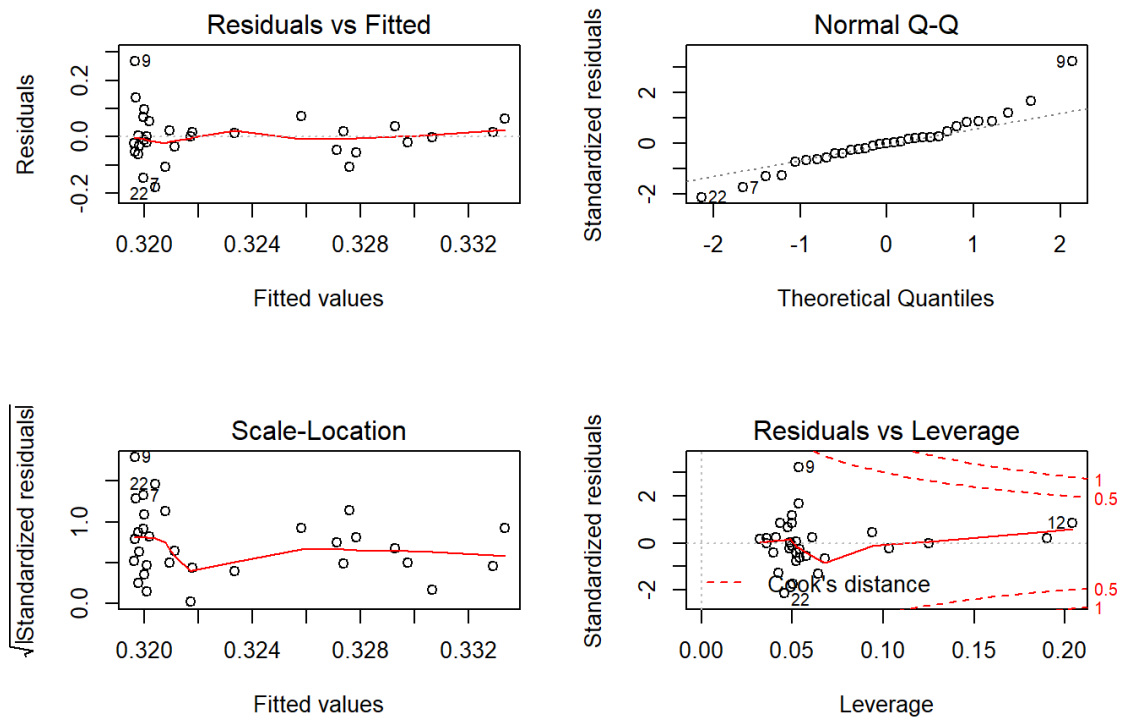


Figura 6. Comparación gráfica de los modelos

Par (mfrow=c(1,1))

De acuerdo con la figura 6 no se encontró una relación entre la incidencia y las variables climáticas evaluadas.

Probablemente la falta de ajuste observado en el modelo estudiado en esta investigación pueda ser explicado por los hallazgos de Baloch et al. (2020), quienes al aplicar el modelo MaxEnt para predecir el comportamiento de *S. frugiperda* en Asia determinaron que la respuesta de esta especie muestra mejores resultados de ajuste cuando las temperaturas superan los 30 °C y la precipitación está por debajo de un valor promedio mensual de 100 mm. Estos autores sugieren hacer evaluaciones de las variables climáticas (temperaturas mínimas y máximas, precipitación) diferenciando en varios momentos del día (mañana, tarde, noche), de modo de poder realizar modelos más ajustados.

Sin embargo, a pesar de esta falta de ajuste, si se observó respuesta similar a lo obtenido por Valdés-Torres et al. (2012), quienes demostraron mediante un modelo predictivo una relación cuadrática entre la temperatura y el desarrollo de *S.*

frugiperda en México, obteniendo los siguientes modelos para huevo, larvas y pupas: $EH=85,9-0,387(T-24,6)^2$; $SL=91,84-0,948 (T-24,6) -0,363(T-24,6)^2$ y $SP=70,0-0,302 (T-24,6)^2$. Con base en los resultados de Valdés-Torres et al. (2012) quienes señalaron que *S. frugiperda* muestra un amplio rango de temperatura que varía entre 8,7 y 39,8 °C donde la plaga puede desarrollarse. Esto podría explicar la relación cuadrática observada en la severidad e incidencia de esta plaga en la sierra ecuatoriana.

5. CONCLUSIONES

1. El porcentaje de la severidad del daño de *S. frugiperda* mostraron una relación cuadrática con las variables climáticas evaluadas, siendo más pronunciada con la humedad relativa y la temperatura, mientras que el efecto de la precipitación fue más leve.
2. Con relación a la incidencia, esta mostró una relación cuadrática con la humedad relativa con incrementos entre los niveles de humedad entre 78 y 84 %, mientras que esta variable mostró una tendencia a disminuir con la disminución de la temperatura. Por su parte, la precipitación tuvo un efecto más leve sobre la incidencia, la cual incrementó con niveles de precipitación alrededor de los 200 mm/mes.
3. A pesar de la respuesta cuadrática observada, los datos climáticos y las variables severidad de daño e incidencia de *S. frugiperda* no se ajustaron a ninguno de los modelos estadísticos propuestos.

6. RECOMENDACIONES

1. Con base en los resultados obtenidos y a los señalado por Baloch et al. (2020), se sugiere evaluar modelos predictivos que consideren evaluaciones de las variables climáticas (temperaturas mínimas y máximas, precipitación) diferenciando en varios momentos del día (mañana, tarde, noche), de modo de poder realizar modelos más ajustados.
2. Dado que *S. frugiperda* muestra mejor respuesta a temperaturas por encima de los 30 °C, se sugiere repetir el presente análisis considerando datos de la región Amazonia y Costa de manera de verificar el ajuste de los modelos planteados en la presente investigación.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Angilletta, M.J., 2009. Thermal Adaptation: A Theoretical and Empirical Synthesis. Oxford University Press, Oxford. 302pp.
- Ayala, O., Navarro, F. & Virla, E. 2013. Evaluation of the attack rates and level of damages by the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae), affecting corn-crops in the northeast of Argentina. Rev. FCA UNCUYO, 45(2), 1-12.
- Bale, J., Masters, G., Hodkinson, I., Awmack, C., Bezemer, M., Brown, V., Butterfield, J., Buse, A., Coulson, J., Farrar, J., Good, J., Harrington, R., Hartley, S., Hefin, T., Lindroth, R., Press, M., Symrnioudis, I., Watt, A. & Whittaker, J. 2002. Herbivory in global climate change research: direct effects of rising temperature on insect herbivores. *Global Change Biology*, 8, 1-16.
- Baloch, M.N., Fan, J. Haseeb, M y Zhang R. 2020. Mapping Potential Distribution of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) in Central Asia. *Insects*, 11: 172-182.
- Baloch, M.N., Fan, J., Haseeb, M. & Zhang, R. 2020. Mapping Potential Distribution of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) in Central Asia. *Insects*, 11, 172; doi:10.3390/insects11030172
- Barfield, C. & Ashley, T. 1987. Effects of corn phenology and temperature on the life cycle of the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (lepidoptera: noctuidae). *Florida Entomologist*, 70(1), 110-116.
- Barros, E., Torres, J., Ruberson, J. & Oliveira, M. 2010. Development of *Spodoptera frugiperda* on different hosts and damage to reproductive structures in cotton. *Entomología Experimentalis et Applicata*, 137, 237-245.

- Baskauf, S. 2003. Factors Influencing Population Dynamics of the Southwestern Corn Borer (Lepidoptera: Crambidae): A Reassessment. *Environmental Entomology*, 32(5), 915-928.
- Baudron, F., Zaman-Allah, M., Chaipa, I., Chari, N. & Chinwada, P. 2019. Understanding the factors influencing fall armyworm (*Spodoptera frugiperda* J.E. Smith) damage in African smallholder maize fields and quantifying its impact on yield. A case study in Eastern Zimbabwe. *Crop Protection*, 120, 141-150.
- Baxter, P. & Possingham, H. 2011. Optimizing search strategies for invasive pests: learn before you leap. *Journal of Applied Ecology*, 48, 86–95.
- CABI. 2020. Invasive Species Compendium Datasheets – *Spodoptera frugiperda* (fallarmyworm). Online at: <https://www.cabi.org/isc/datasheet/29810#REF-DDB-139978> (accessed 12 April 2020).
- Camell, M. & Knight, J. 1992. Effects of Climatic Change on the Population Dynamics of Crop Pests. *Advances in Ecological Research*, 22, 117-162.
- Cannon, R. 1998. The implications of predicted climate change for insect pests in the UK, with emphasis on non-indigenous species. *Global Change Biology*, 4, 785–796.
- Casmuz, A., Juárez, M., Socías, M., Murúa, M., Prieto, S., Medina, S., Willink, E. y Gastaminza, G. 2010. Revisión de los hospederos del gusano cogollero del maíz, *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae). *Revista de la Sociedad Entomológica Argentina*, 69(3-4), 209-231.
- Castro, M. & Pitre, H. 1988. Development of fall armyworm, *Spodoptera frugiperda*, from Honduras and Mississippi on sorghum or corn in the laboratory. *Florida Entomologist*, 71(1), 49-56.

- Chen, I., Hill, J., Ohlemüller, R., Roy, D. & Thomas, C. 2011. Rapid Range Shifts of Species Associated with High Levels of Climate Warming. *Science*, 333, 1024-1026.
- Cornelissen, T. 2011. Climate Change and Its Effects on Terrestrial Insects and Herbivory Patterns. *Neotropical Entomology*, 40(2), 155-163.
- Cruz, I. & Turpin, F. 1983. Yield Impact of Larval Infestations of the Fall Armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) to Midwhorl Growth Stage of Corn. *Journal of Economic Entomology*, 76, 1052-1054.
- Cruz, I., Figueiredo, M., Oliveira, A. & Vasconcelos, C. 1999. Damage of *Spodoptera frugiperda* (Smith) in different maize genotypes cultivated in soil under three levels of aluminium saturation. *International Journal of Pest Management*, 45(4), 293-296.
- Dale, V., Joyce, L., McNulty, S., Neilson, R., Ayres, M., Flannigan, M., Hanson, P., Irland, L., Lugo, A., Peterson, C., Simberloff, D., Swanson, F., Stocks, B. & Wotton, M. 2001. Climate Change and Forest Disturbances. *BioScience*, 51(9), 723-734.
- Day, R., Abrahams, P., Bateman, M., Beale, T., Clottey, V., Cock, M... & Witt, A. 2017. Fall armyworm: impacts and implications for Africa. *Outlooks on Pest Management*, 196-201.
- Deutsch, C. A., Tewksbury, J. J., Tigchelaar, M., Battisti, D. S., Merrill, S. C., Huey, R. B., & Naylor, R. L. 2018. Increase in crop losses to insect pests in a warming climate. *Science*, 361(6405), 916–919. <https://doi.org/10.1126/science.aat3466>
- Di Nucci, D., Palomba, F., De Rosa, G., Bavota, G., Oliveto, R., & De Lucia, A. (2018). A Developer Centered Bug Prediction Model. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 44(1), 5–24. <https://doi.org/10.1109/TSE.2017.2659747>

- Diffenbaugh, N., Krupke, C., White, M. & Alexander, C. 2008. Global warming presents new challenges for maize pest management. *Environmental Research Letters*. Online at stacks.iop.org/ERL/3/044007.
- Early, R., González-Moreno, P., Murphy, S. & Day, R. 2018. Forecasting the global extent of invasion of the cereal pest *Spodoptera frugiperda*, the fall armyworm. *NeoBiota*, 40, 25-50.
- FAO, 2019. Briefing Note on FAO Actions on Fall Armyworm. Rome, Italy: FAO. <http://www.fao.org/3/a-bs183e.pdf>
- FAO. 2016. Save and Grow in practice: maize, rice, wheat A guide to sustainable cereal production. FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. Rome. 120 pp.
- FAO. 2020. FAOSTAT, Food Supply. Online. Acceso Abril, 2020. <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC>
- García, A., Ferreira, C., Godoy, W. & Meagher, R. 2018. A computational model to predict the population dynamics of *Spodoptera frugiperda*. *Journal of Pest Science*, <https://doi.org/10.1007/s10340-018-1051-4>
- Goergen, G., Kumr, L., Sankung, S., Togola, A. & Tmó, M. 2016. First Report of Outbreaks of the Fall Armyworm *Spodoptera frugiperda* (J E Smith) (Lepidoptera, Noctuidae), a New Alien Invasive Pest in West and Central Africa. *PLOS ONE*, 11, 10: e0165632.
- Hauser, C y McCarthy, M. 2009. Streamlining search and destroy————— : cost-effective surveillance for invasive species management. *Ecology Letters*, 12, 683–692.
- Hernández-Sampieri, R. Fernández-Collado, C. y Baptista-Lucio, M.P. 2010. *Metodología de la Investigación*. Quinta edición. McGraw Hill Educación. Ciudad de México. 656 p.

- Houghton JT, Meiro Filho LG, Callander BA, Harris N, Kattenberg A, Maskell K (eds) 1996. Climate Change 1995: The Science of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, 584pp.
- Hruska, A. & Gould, F. 1997. Fall Armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) and *Diatraea lineolata* (Lepidoptera: Pyralidae): Impact of Larval Population Level and Temporal Occurrence on Maize Yield in Nicaragua. *Journal of Economic Entomology*, 90(2), 611-622.
- IPCC WGI 2007 Climate Change 2007 The Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/ar4_wg2_full_report.pdf
- Jaramillo-Barrios, C., Barragán, E. & Monje, B. 2019. Populations of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) cause significant damage to genetically modified corn crops. *Revista Facultad Nacional de Agronomía*, 72(3), 8953-8962.
- Jaworsky, T. & Hilszczański, J. 2013. The effect of temperature and humidity changes on insects development and their impact on forest ecosystems in the context of expected climate change. *Forest Research Papers*, 74(4), 345-355.
- Jetz, W., McPherson, J.M. & Guralnick, R.P. 2012. Integrating biodiversity distribution knowledge: toward a global map of life. *Trends in Ecology and Evolution*, 27, 151-159.
- Knipling, E. 1980. Regional Management of the fall armyworm. A Realistic Approach?. *Florida Entomologist*, 63(4), 468-480.

- MAGAP. 2016. Ministerio de Agricultura y Ganadería. Revista Somos MAGAP. Primera Edición. 20pp. <https://www.agricultura.gob.ec/biblioteca/> 25/04/2020.
- Meagher, R., Nagoshi, R., Stuhl, C. & Mitchell, R. 2004. Larval development of fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) on different cover crop plants. Florida Entomologist, 87(4), 454-460.
- Meehl, G.M., Washington, W.M., Collins, W.D., Ablaster, J.M., Hu, A., Buja, L.E... & Teng, H. 2005. How Much More Global Warming and Sea Level Rise?.
- Mello, D., De Freitas, A., Andrade, K., Dos Santos, C., Oliveira, P.M. & Neves, M.C. 2016. Biology and nutrition of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) fed on different food sources. Scientia Agricola, 74(1), 18-31.
- Montezano, D., Sosa-Gómez, D., Specht, A. & Ferreira, V. 2018. Host plants of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) in the Americas. African Entomology 26(2), 286-300.
- Murúa, G., Molina-Ochoa, J. & Coviella, C. 2006. Population Dynamics of the Fall Armyworm, *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) and its Parasitoids in Northwestern Argentina. Florida Entomologist, 89(2), 175-182. Science, 307, 1769-1772.
- Murúa, M.G., Nagoshi, R.N., Dos Santos, D.A., Hay-Roe, M.N., Meagher, R.I. & Vilardi, J.C. 2015. Demonstration Using Field Collections that Argentina Fall Armyworm Populations Exhibit Strain-specific Host Plant Preferences. Journal of Economic Entomology, 108(5), 2306-2315.
- Murúa, M.G., Virla, E.G. & Defagó, V. 2003. Evaluación de cuatro dietas artificiales para la cría de *Spodoptera frugiperda* (Lep.: Noctuidae) destinada a mantener poblaciones experimentales de himenópteros parasitoides. Boletín de Sanidad Vegetal. Plagas, 29, 43-51.

- Nagoshi, R. N. & Meagher, R. L. 2008. Review of Fall Armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) Genetic Complexity and Migration. Florida Entomologist, 91(4):546-554 (2008). <https://doi.org/10.1653/0015-4040-91.4.546>
- Nagoshi, R.N. Goergen, G., Tounou, K.A., Agboka, K., Koffi, D. & Meagher, R. 2018. Analysis of strain distribution, migratory potential, and invasion history of fall armyworm populations in northern SubSaharan Africa. Scientific Reports, (2018) 8:3710 DOI:10.1038/s41598-018-21954-1
- Nagoshi, R.N., Nagoshi, B.Y., Cañarte, E., Navarrete, B., Solórzano, R. & Garcés-Carrera, S. 2019. Genetic characterization of fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) in Ecuador and comparisons with regional populations identify likely migratory relationships. PLOS ONE <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0222332>
- Navarrete, B., Intriago, L., Peñaherrera, S., Terrero, P., Vera, D. y Herrera, M. 2016. Cría de depredadores del género *Podisus* usando *Spodoptera frugiperda* como alimento, bajo condiciones controladas. Revista Técnica, 16, 26-31.
- Nboyine et al 2019. A new pest, *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith), in tropical Africa: Its seasonal dynamics and damage in maize fields in northern Ghana. Crop Protection 127, <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2019.104960>
- Oerke, E.C. 2006. Crop losses to pests. Journal of Agricultural Science, 144, 31-43.
- Pashley, D.P. 1986. Host-associated Genetic Differentiation in Fall Armyworm (Lepidoptera: Noctuidae): A Sibling Species Complex?. Annals of the Entomological Society of America, 79(6), 898-904.
- Pashley, D.P., Hardy, T.N. & Hammond, A.M. 1995. Host Effects on Developmental and Reproductive Traits in Fall Armyworm Strains (Lepidoptera: Noctuidae). Annals of the Entomological Society of America, 88(6), 748-755.

- Porter, J.H., Parry, M.L. & Carter, T.R. 1991. The potential effects of climatic change on agricultural insect pests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 57, 221-240.
- Porter, J.R., L. Xie, A.J. Challinor, K. Cochrane, S.M. Howden, M.M. Iqbal, D.B. Lobell, and M.I. Travasso, 2014: Food security and food production systems. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 485-533.
- Rahmathulla, V.K., Sathyanarayana, K. & Angadi, B.S. 2015. Influence of Abiotic Factors on Population Dynamics of Major Insect Pests of Mulberry. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 18 (5), 215-223.
- Ram, P., Sreenivas, G. & Leela, P. 2017. Impact of sustainable weed management practices on growth, phenology and yield of rabi grain maize (*Zea mays* L.). *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 6(7), 701-710.
- Ramírez-Cabral, N., Kumar, L. & Shabani, F. 2017. CLIMATE CHANGE AND AGRICULTURE RESEARCH PAPER Future climate scenarios project a decrease in the risk of fall armyworm outbreaks. *Journal of Agricultural Science*, 1-20.
- Ranum, P., Peña-Rosas, J. & García-Casal, M. 2014. Global maize production, utilization, and consumption. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 105-112.
- Rosenzweig, C., Elliott, J., Deryng, D., Ruane, A. C., Müller, C., Arneth, & Jones, J. 2014. Assessing agricultural risks of climate change in the 21st

century in a global gridded crop model intercomparison. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 111(9), 3268–3273. <https://doi.org/10.1073/pnas.1222463110>

Schmidt-Durán, A., Villalba-Velásquez, V., Chacón-Cerdas, R., Martínez, K. & Flores-Mor, D. 2014. Larval stage prediction model of *Spodoptera frugiperda* collected in fig (*Ficus carica*) and discovery of *Apanteles* sp. as its parasitoid. *Tecnología en marcha*, 28(1), 47-58.

Sharanabasappa, Kalleshwaraswamy, C.M., Maruthi, M.S. & Pavithra, H.B. 2018. Biology of invasive fall army worm *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae) on maize. *Indian Journal of Entomology*, 80(3), 540-543.

Shiferaw, B., Prasanna, B., Hellin, J. & Banziger, M. 2011. Crops that feed the world 6. Past successes and future challenges to the role played by maize in global food security. *Food Security*, 3, 307-327.

Sokame, B.M., Rebaudo, F., Mallusi, P., Subramanian, S., Kilalo, D.C., Juma, G. & Calatayud, P.A. 2020. Influence of Temperature on the Interaction for Resource Utilization between Fall Armyworm, *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae), and a Community of Lepidopteran Maize Stemborers Larvae. *Insects*, 11, 73 www.mdpi.com/journal/insects

Srikanth, J., Geetha, N., Singaravelu, B., Ramasubramanian, T., Mahesh, P., Saravanan, L., Salin, K., Chitra, N. & M. Muthukumar. 2018. First Report of Occurrence of Fall Armyworm *Spodoptera frugiperda* in Sugarcane from Tamil Nadu, India. *Journal of Sugarcane Research*, 8(2), 195-202.

Tonnang, H.E., Hervé, B.D., Biber-Freudenberger, L., Salifu, D., Subramanian, S., Ngowi, V.B.... & Borgemeister, C. et al., 2017. Advances. *Ecological Modelling*, Ecological, 354, 88-103.

Valdez-Torres, J.B., Soto-Landeros, F., Osuna-Enciso, T. y Báez-Sañudo, M.A. 2012. Modelos de predicción fenológica para maíz blanco (*Zea mays* L.) y

gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda* J. E. Smith). *Agrociencia*, 46, 399-410.

Valdez-Torres, J.B., Soto-Landeros, F., Osuna-Enciso, T. y Báez-Sañudo, M.A. 2012. Modelos de predicción fenológica para maíz blanco (*Zea mays* L.) y gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda* J. E. Smith). *Agrociencia* 46: 399-410.

Wang, R., Jiang, C., Guo, X., Chen, D., You, C., Zhang, Y... & Li, Q. 2019. Potential distribution of *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith) in China and the major factors influencing distribution. *Global Ecology and Conservation*, 21, <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2019.e00865>

Westbrook, J.K., Nagoshi, R.N., Meaguer, R.L., Fleischer, S.J. & Jaraim, S. 2015. Modeling seasonal migration of fall armyworm moths. *International Journal of Biometeorology*, DOI 10.1007/s00484-015-1022-x

Wyckhuys, K. & O'Neil, R. 2006. Population dynamics of *Spodoptera frugiperda* Smith (Lepidoptera: Noctuidae) and associated arthropod natural enemies in Honduran subsistence maize. *Crop Protection* 25, 1180-1190.