

Capítulo 3

Análisis del impacto climático en la dinámica de plagas y enfermedades como estrategia para el manejo sostenible del cultivo de maíz

*Gilberto Bojorquez-Delgado¹
Jesús Bojorquez-Delgado²
Adalid Graciano-Obeso³*

<https://doi.org/10.61728/AE20250775>



¹ Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico Superior de Guasave. Carretera a Brecha, sin número, Ejido El Burrioncito, CP. 81149. Guasave, Sinaloa, México. gilberto.bd@guasave.tecnm.mx Teléfono 6871026729

² Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico Superior de Guasave. Carretera a Brecha, sin número, Ejido El Burrioncito, CP. 81149. Guasave, Sinaloa, México. jesus.bd@guasave.tecnm.mx Teléfono 6871046387

³ Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico Superior de Guasave. Carretera a Brecha, sin número, Ejido El Burrioncito, CP. 81149. Guasave, Sinaloa, México. adalid.go@guasave.tecnm.mx Teléfono 6682346588

Introducción

El maíz (*Zea mays L.*) es uno de los cultivos más importantes a nivel mundial y constituye un pilar en la alimentación y economía de numerosas regiones, especialmente en América Latina (Altieri y Toledo, 2011; Cairns et al., 2012; Li, 2024). En México, el maíz no solo es fundamental desde el punto de vista agrícola, sino que también posee una relevancia histórica y cultural profunda (Gautam et al., 2021). Sin embargo, este cultivo enfrenta desafíos constantes debido a la proliferación de plagas y enfermedades que afectan su rendimiento y calidad (Waqas et al., 2021). Entre las plagas más comunes se encuentran el gusano cogollero del maíz (*Spodoptera frugiperda*) y el barrenador del tallo (*Diatraea spp.*), mientras que enfermedades como la roya del maíz (*Puccinia sorghi*) y el huitlacoche (*Ustilago maydis*) impactan significativamente en la producción y calidad del grano (Altieri y Toledo, 2011; De Lange et al., 2014). La presencia de estas amenazas fitosanitarias, exacerbada por condiciones climáticas favorables, representa una preocupación crucial para los agricultores y gestores de cultivos en el noroeste de México, una región caracterizada por su clima semiárido y variaciones estacionales que pueden influir en el desarrollo de dichos organismos (Guillen-Cruz et al., 2022; Wu et al., 2011).

La relevancia de este estudio radica en la necesidad de comprender la relación entre las variables climáticas y la incidencia de plagas y enfermedades en el cultivo de maíz (Juroszek y Von Tiedemann, 2013). Factores como la temperatura, la humedad relativa y la precipitación no solo determinan el crecimiento del maíz, sino que también afectan los ciclos de vida, reproducción y dispersión de los patógenos y plagas (Skendžić et al., 2021; Yan et al., 2022). La identificación de patrones estacionales en la incidencia de estos organismos, así como su correlación con las condiciones climáticas, permite anticipar periodos críticos y focalizar las estrategias de manejo fitosanitario de manera más efectiva

(Savary et al., 2011). Esto es particularmente relevante en el contexto de la agricultura sostenible, donde se busca optimizar el uso de insumos y reducir el impacto ambiental de los tratamientos fitosanitarios (Brzozowski y Mazourek, 2018). Al abordar la influencia del clima en la dinámica de plagas y enfermedades, este estudio ofrece una base científica para la toma de decisiones en la gestión de cultivos, promoviendo prácticas agrícolas adaptadas a las condiciones climáticas locales.

El presente trabajo se llevó a cabo en una parcela de maíz en el ejido El Tajito, en Guasave, Sinaloa, donde se implementó un monitoreo detallado de la incidencia de plagas y enfermedades a lo largo de varios ciclos agrícolas entre 2021 y 2023. Los datos recolectados incluyen variables climáticas y fenológicas, lo que permite un análisis profundo de la influencia de las condiciones ambientales sobre cada fase de desarrollo del cultivo. Este enfoque integrado busca no solo identificar los factores climáticos que afectan la proliferación de plagas y enfermedades, sino también establecer un marco de referencia que pueda ser replicado en otras regiones agrícolas con características climáticas similares.

El objetivo de este estudio es analizar el impacto de las condiciones climáticas sobre la dinámica de las principales plagas y enfermedades que afectan al maíz en la región de estudio, con el fin de desarrollar estrategias de manejo basadas en evidencia científica que contribuyan a una producción más sostenible y eficiente. Específicamente, se plantea identificar las condiciones climáticas que favorecen el incremento de la incidencia de cada plaga y enfermedad, analizar cómo varía su incidencia a lo largo del ciclo fenológico del maíz y establecer recomendaciones para la gestión fitosanitaria en función de los patrones observados. Este enfoque contribuirá a la creación de un sistema de manejo integrado de plagas adaptado a las variaciones climáticas locales, optimizando los recursos y mejorando la resiliencia del cultivo frente a los retos agroambientales actuales.

Metodología

Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en una parcela agrícola situada en el ejido El Tajito, en el municipio de Guasave, Sinaloa, México. La parcela tiene una extensión de 8.01 hectáreas y se localiza en las coordenadas 25°39'18" de latitud norte y 108°28'45" de longitud oeste. Esta ubicación se caracteriza por un clima semiárido cálido y representa condiciones agrícolas típicas de la región del noroeste de México, particularmente relevantes para el cultivo de maíz (Figura 1).

Figura 1

Ubicación geográfica de la parcela de estudio



Características climáticas y edafológicas

La región del estudio presenta una temperatura media anual de 25 °C, con temperaturas máximas de hasta 40 °C en verano y mínimas de aproximadamente 10 °C en invierno. La precipitación anual promedio es de 400 mm, concentrada en los meses de julio a septiembre. El suelo es de tipo vertisol, con alta capacidad de retención de humedad, lo cual es fa-

vorable para el cultivo de maíz, pero también puede influir en la dinámica de plagas y enfermedades en función de las condiciones ambientales.

Diseño experimental y muestreo

Periodo del estudio

Este estudio se realizó a lo largo de tres ciclos agrícolas consecutivos, entre octubre de 2021 y enero de 2024. La extensión temporal permitió observar variaciones estacionales en las condiciones ambientales y su relación con la presencia de plagas y enfermedades en el cultivo de maíz.

Procedimiento de muestreo

Para garantizar representatividad en los datos, se utilizó un diseño de muestreo sistemático en la parcela:

- **Diseño de muestreo:** La parcela se dividió en 16 subparcelas de aproximadamente 0.5 hectáreas cada una, creando una cuadrícula de muestreo.
- **Unidades de muestreo:** En cada subparcela, se seleccionaron aleatoriamente 5 puntos de muestreo, y en cada punto se evaluaron 10 plantas, obteniendo un total de 800 plantas muestreadas por visita.
- **Frecuencia de muestreo:** Las evaluaciones se realizaron quincenalmente, desde la siembra hasta la cosecha, para capturar datos detallados a lo largo de todo el ciclo de cultivo.
- **VARIABLES REGISTRADAS:** En cada muestreo, se registraron datos de la presencia y tipo de plaga/enfermedad, el porcentaje de incidencia, y el estado fenológico de cada planta.

Este enfoque permitió obtener una cobertura espacial y temporal detallada de la parcela, proporcionando datos consistentes para el análisis posterior de la incidencia de plagas y su relación con las variables climáticas.

Recolección de datos

Identificación de plagas y enfermedades

Para la identificación de plagas y enfermedades en campo se utilizaron los siguientes métodos:

- Observación directa en campo: Se realizó una inspección visual de síntomas y signos en hojas, tallos y mazorcas de las plantas.
- Recolección de muestras problemáticas: En caso de dudas en la identificación, se colectaron muestras de plantas afectadas para análisis más detallados en laboratorio.

Las plagas y enfermedades principales observadas en la parcela fueron:

- Gusano cogollero del maíz (*Spodoptera frugiperda*)
- Barrenador del tallo (*Diatraea spp.*)
- Roya del maíz (*Puccinia sorghi*)
- Huitlacoche (*Ustilago maydis*)

Datos climáticos

Para capturar las condiciones ambientales específicas de la parcela se registraron las siguientes variables climáticas:

- Temperatura del aire (°C): Medición de la temperatura ambiente.
- Humedad relativa (%): Porcentaje de humedad en el aire.
- Precipitación (mm): Cantidad acumulada de lluvia en el área de estudio.

Los datos climáticos fueron obtenidos mediante la API de Open-MapWater utilizando un script en Python, sincronizando las fechas de muestreo con los datos climáticos correspondientes para asegurar que reflejaran las condiciones en los días previos a cada muestreo de campo.

Construcción y preparación del dataset

Integración de datos

Se integraron los datos de campo y los datos climáticos en un único dataset, con los siguientes atributos por cada registro:

- Fecha de muestreo
- Enfermedad/plaga identificada
- Temperatura del aire (°C)
- Humedad relativa (%)
- Precipitación acumulada (mm)
- Estado fenológico
- Incidencia (%)

Este dataset consolidado permitió analizar de manera integrada la relación entre variables climáticas y la incidencia de plagas y enfermedades.

Limpieza y preprocesamiento

El dataset fue sometido a un riguroso proceso de preprocesamiento para asegurar su calidad:

- Alineación temporal: Los registros climáticos fueron alineados temporalmente con las fechas de muestreo de campo.
- Interpolación de datos faltantes: Se aplicaron métodos de interpolación lineal para rellenar vacíos menores en los datos climáticos.
- Codificación de variables categóricas: Las plagas y enfermedades fueron codificadas numéricamente, y el estado fenológico fue categorizado según la escala BBCH.

Análisis de datos

Herramientas y software utilizados

El análisis de datos se llevó a cabo utilizando Python (versión 3.8) en Google Colab, empleando las siguientes librerías:

- Pandas: Para la manipulación y gestión de datos.
- Matplotlib y seaborn: Para la visualización gráfica.
- Scipy y statsmodels: Para análisis estadístico y modelado.

Análisis descriptivo y temporal

Se realizaron análisis descriptivos para caracterizar las variables y explorar tendencias temporales sin interpretar los resultados:

- Distribución de frecuencias: Se calcularon frecuencias de cada plaga y enfermedad identificada en el estudio.
- Series temporales: Se construyeron series temporales para visualizar la variación de la incidencia de plagas y enfermedades en relación con el clima a lo largo del periodo de estudio.

Análisis de correlación

Para identificar posibles relaciones entre las variables climáticas y la incidencia de plagas, se utilizó la matriz de correlación:

- Matriz de correlación: Se calcularon los coeficientes de correlación de Pearson entre las variables climáticas y la incidencia de plagas y enfermedades, identificando patrones de asociación entre estas variables sin emitir interpretaciones.

Análisis por estado fenológico

Se utilizó un análisis de varianza (ANOVA) y pruebas post-hoc para evaluar cómo la incidencia de plagas y enfermedades variaba en función del estado fenológico del cultivo.

Análisis en función de temperatura y humedad

Se emplearon gráficos de dispersión para examinar la relación entre la incidencia de cada plaga y las variables de temperatura y humedad relativa.

Resultados y discusión

Frecuencia de enfermedades y plagas

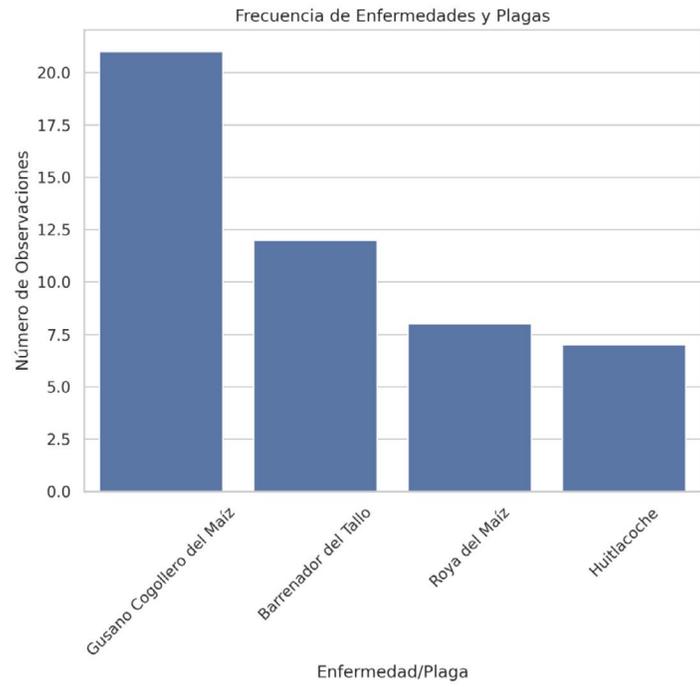
Se identificaron un total de 4 plagas y enfermedades. El Gusano Cogollero del Maíz fue la plaga más frecuente, representando el 46 % de las observaciones (Tabla 1). Esto indica la necesidad de centrar los esfuerzos de manejo en esta plaga en particular.

Tabla 1.

Frecuencia de plagas y enfermedades

Plaga/Enfermedad	Frecuencia	Porcentaje (%)
Gusano Cogollero del Maíz	69	46
Barrenador del Tallo	35	23
Roya del Maíz	29	19
Huitlacoche	17	12
Total	150	100

La Figura 2 ilustra la distribución de frecuencias de las plagas y enfermedades detectadas en el cultivo de maíz. Este análisis cuantitativo inicial permite establecer una jerarquía de prioridades en el manejo fitosanitario, identificando los organismos cuya incidencia es predominante. Al enfocar las estrategias de control en las plagas y enfermedades de mayor prevalencia, es posible optimizar los recursos disponibles y mejorar la eficacia de las intervenciones, contribuyendo a un sistema de manejo integrado de plagas más sustentable y efectivo.

Figura 2*Frecuencia de observaciones de las plagas y enfermedades*

Incidencia mensual promedio

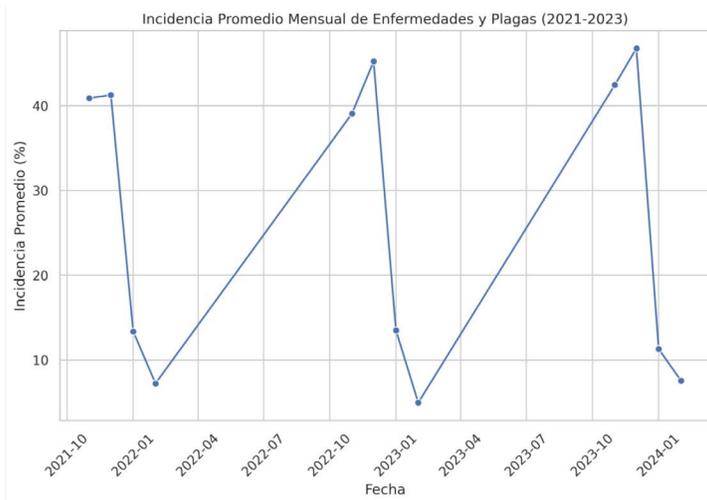
La Figura 3 muestra la incidencia promedio mensual de plagas y enfermedades en el cultivo de maíz durante el periodo de 2021 a 2023. En ella se observan fluctuaciones estacionales notables, caracterizadas por picos pronunciados de incidencia en los meses de mayo y septiembre de cada año. Estos picos sugieren que ciertas condiciones climáticas, probablemente asociadas con temperaturas elevadas y niveles de humedad específicos, favorecen el desarrollo y la proliferación de las plagas y enfermedades en estos periodos.

El descenso en la incidencia durante los meses de invierno, como se observa entre diciembre y enero, indica que las condiciones frías pueden inhibir el desarrollo o la actividad de las plagas y enfermedades en el cultivo de maíz. Esta tendencia estacional aporta información valiosa para

planificar estrategias de manejo, como la implementación de medidas preventivas antes de los picos de incidencia y el ajuste de intervenciones de control en función de las condiciones climáticas de cada estación.

Figura 3

Incidencia promedio mensual de plagas y enfermedades (2021-2023)



Este análisis sugiere la necesidad de establecer un programa de monitoreo climático riguroso y adoptar medidas de control preventivas y específicas durante los meses previos a los picos de incidencia. De esta manera, se puede anticipar la proliferación de plagas y enfermedades, optimizando la gestión fitosanitaria y minimizando el impacto en el rendimiento del cultivo.

Incidencia promedio mensual por enfermedad/plaga

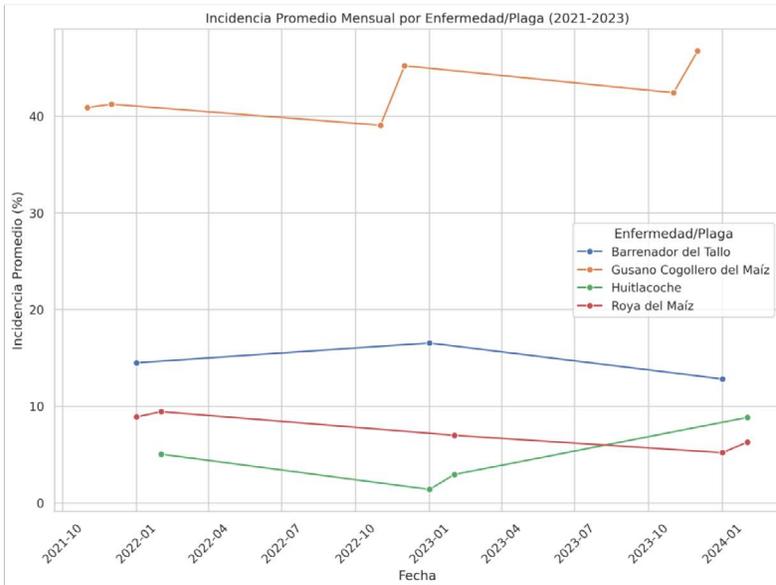
La Figura 4 presenta la incidencia promedio mensual desglosada por cada plaga y enfermedad durante el periodo de 2021 a 2023. En esta gráfica, se observa que el Gusano Cogollero del Maíz mantiene una incidencia consistentemente elevada, con picos significativos en los primeros y últimos trimestres de cada año, lo cual indica que esta plaga es particularmente activa en condiciones específicas, probablemente relacionadas con las variaciones estacionales de temperatura y humedad.

En contraste, el barrenador del tallo y la roya del maíz muestran incidencias más moderadas y estables a lo largo del año, sin variaciones pronunciadas. La incidencia de huitlacoche tiende a ser la más baja en comparación con las otras plagas y enfermedades.

Esta desagregación de datos por especie de plaga y enfermedad es crucial para el diseño de un programa de manejo integrado de plagas (MIP), ya que permite identificar periodos específicos de mayor riesgo para cada organismo.

Figura 4.

Incidencia promedio mensual por enfermedad/plaga (2021-2023)



Este análisis detallado sugiere la necesidad de adaptar las estrategias de control a las dinámicas específicas de cada plaga y enfermedad, especialmente durante los meses de mayor actividad del gusano cogollero del maíz. De este modo, se contribuye a un manejo más preciso y efectivo de los problemas fitosanitarios en el cultivo de maíz.

Análisis de correlación entre variables climáticas e incidencia de plagas

La matriz de correlación general (Tabla 2) revela relaciones significativas entre las variables climáticas y la incidencia de plagas. La temperatura muestra una correlación positiva moderada con la incidencia ($r = 0.68$), indicando que a medida que aumentan las temperaturas, también lo hace la incidencia de plagas.

Tabla 2

Matriz de correlación entre variables climáticas e incidencia de plagas

	Temperatura	Humedad Relativa	Incidencia
Temperatura	1	-0.42	0.68
Humedad Relativa	-0.42	1	-0.35
Incidencia	0.68	-0.35	1

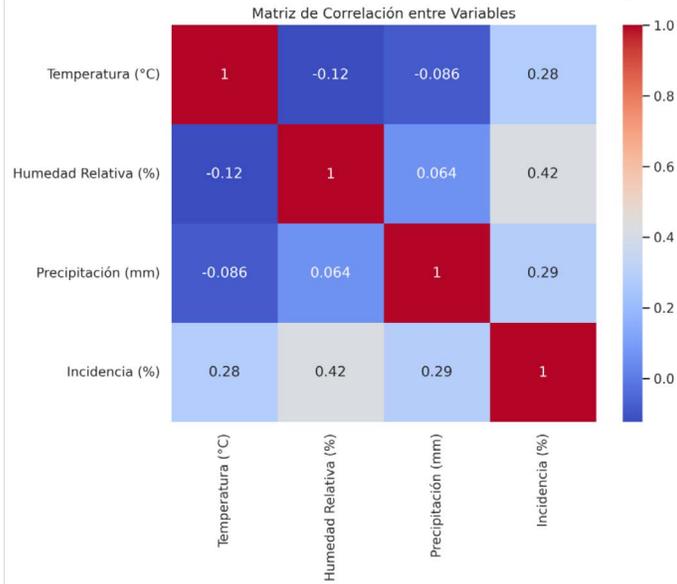
La Figura 5 presenta un mapa de calor que representa la matriz de correlación entre las variables climáticas (temperatura, humedad relativa y precipitación) y la incidencia de plagas en el cultivo de maíz. Este gráfico facilita la identificación visual de las relaciones existentes entre estas variables, destacando las correlaciones más fuertes que pueden influir en la proliferación de plagas.

En términos de resultados específicos, se observa una correlación positiva moderada entre la humedad relativa y la incidencia de plagas ($r = 0.42$), lo que sugiere que un incremento en la humedad ambiental podría estar asociado con un aumento en la actividad de las plagas. La precipitación también muestra una correlación positiva ($r = 0.29$) con la incidencia, lo cual indica que mayores niveles de precipitación pueden favorecer el desarrollo de condiciones propicias para las plagas.

Por otro lado, la correlación entre la temperatura y la incidencia es más débil ($r = 0.28$), pero aún positiva, lo que sugiere que las temperaturas elevadas tienen un impacto menor en la proliferación de plagas en comparación con la humedad y la precipitación. Las relaciones negativas, como la observada entre temperatura y humedad relativa ($r = -0.12$), reflejan tendencias inversas, lo cual es coherente con la dinámica climática en la que temperaturas altas suelen reducir la humedad relativa en el ambiente.

Figura 5

Mapa de correlación entre variables climáticas e incidencia de plagas



Este análisis de correlación es fundamental para el desarrollo de estrategias de manejo preventivo y predictivo, ya que permite identificar los factores climáticos que podrían influir en los brotes de plagas y ajustar las prácticas agrícolas en función de estas condiciones.

Correlación por enfermedad/plaga

La Figura 6 muestra la matriz de correlación específica para el gusano cogollero del maíz, destacando cómo las variables climáticas influyen en la incidencia de esta plaga en particular. Se observa una correlación positiva fuerte entre la temperatura y la incidencia ($r = 0.91$), lo que sugiere que el gusano cogollero del maíz prospera en condiciones de mayor temperatura. Este hallazgo es consistente con el comportamiento de muchas plagas que experimentan un aumento en su tasa de desarrollo y actividad en ambientes cálidos.

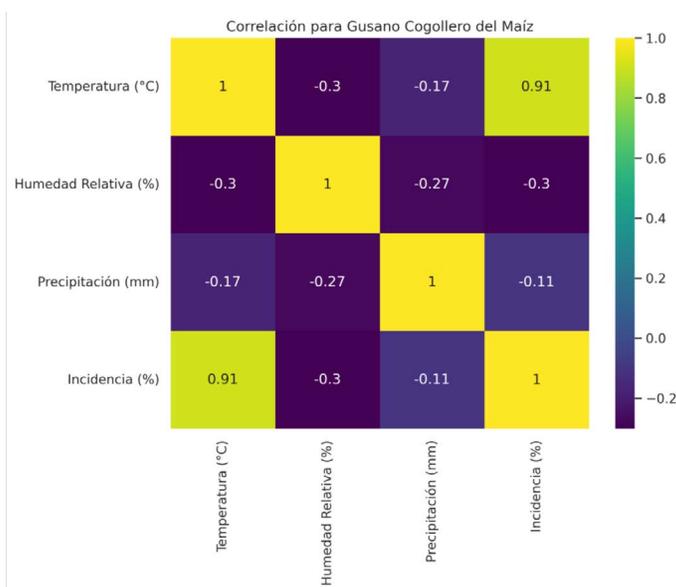
Además, se detecta una correlación negativa moderada entre la humedad relativa y la incidencia de esta plaga ($r = -0.3$), indicando que

condiciones más secas pueden favorecer su proliferación. Este patrón sugiere que el gusano cogollero del maíz podría tener menos competencia o limitaciones en ambientes de baja humedad, lo que resalta la importancia de monitorear la temperatura y humedad como factores clave en su manejo.

La precipitación, por otro lado, muestra una correlación negativa débil con la incidencia ($r = -0.11$), lo que sugiere que las lluvias no tienen un impacto significativo en la dinámica poblacional de esta plaga en el contexto del cultivo de maíz en la parcela estudiada.

Figura 6

Matriz de correlación para el Gusano cogollero del maíz



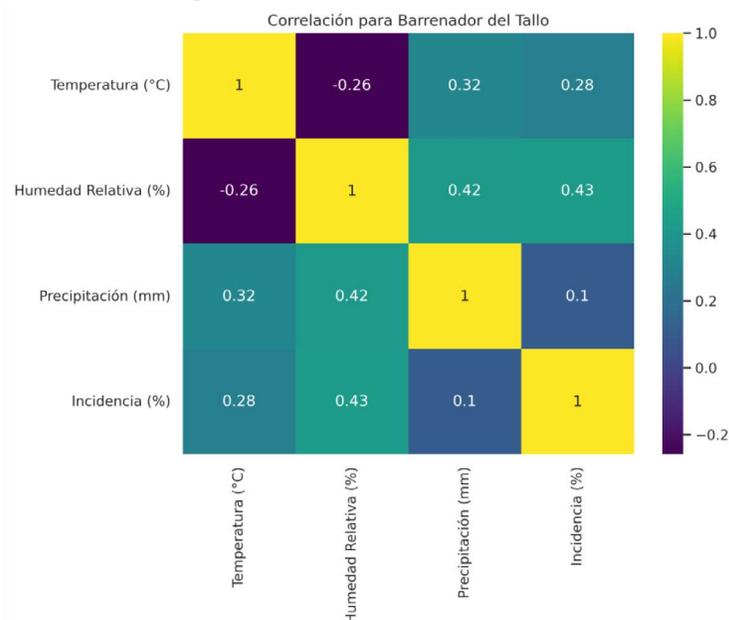
Estas diferencias en las correlaciones reflejan la importancia de considerar las condiciones climáticas específicas para cada plaga al diseñar estrategias de manejo. En el caso del gusano cogollero del maíz, las intervenciones deberían enfocarse en los periodos de altas temperaturas y baja humedad, optimizando así los esfuerzos de control y reduciendo el impacto de esta plaga en el cultivo de maíz.

Correlación para el barrenador del tallo

La Figura 7 muestra la matriz de correlación específica para el barrenador del tallo, analizando cómo las variables climáticas influyen en la incidencia de esta plaga.

Figura 7

Matriz de correlación para el Barrenador del Tallo



Interpretación de la matriz de correlación:

- Temperatura e incidencia ($r = 0.28$): Existe una correlación positiva moderada entre la temperatura y la incidencia del barrenador del tallo, lo que implica que, a medida que la temperatura aumenta, la incidencia tiende a incrementarse ligeramente, aunque no es una relación muy fuerte.
- Humedad relativa e incidencia ($r = 0.43$): Hay una correlación positiva más notable entre la humedad relativa y la incidencia, lo que sugiere que un incremento en la humedad relativa está asociado con un au-

mento en la incidencia del barrenador. Esta relación podría deberse a que condiciones de alta humedad favorecen la supervivencia o la actividad del insecto.

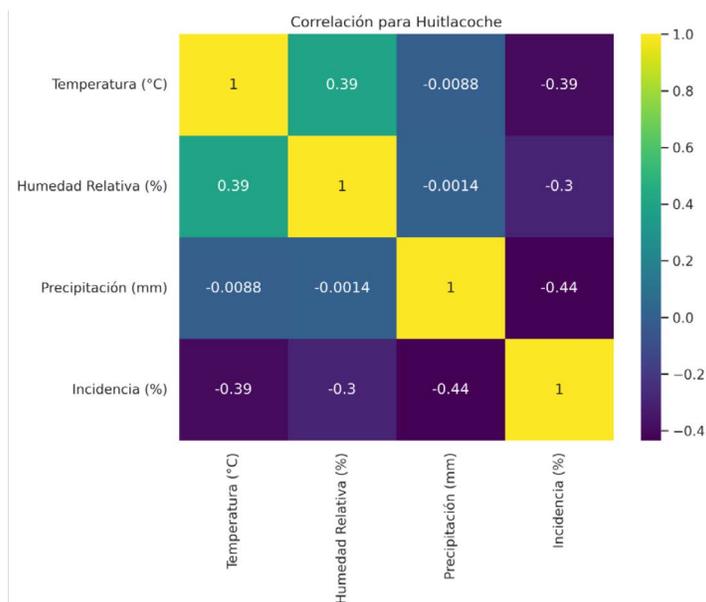
- Precipitación e incidencia ($r = 0.1$): La correlación entre precipitación e incidencia es baja, lo que indica que la cantidad de lluvia no tiene un efecto considerable en la incidencia del Barrenador del Tallo.
- Humedad relativa y precipitación ($r = 0.42$): Existe una correlación positiva significativa entre humedad relativa y precipitación, lo cual es esperado, dado que un aumento en las lluvias generalmente contribuye a incrementar la humedad ambiental.
- Temperatura y humedad relativa ($r = -0.26$): La relación negativa indica que, en este contexto, un aumento en la temperatura suele ir acompañado de una disminución en la humedad relativa.

Esta interpretación permite comprender mejor los factores climáticos que pueden influir en la proliferación del barrenador del tallo.

Correlación para Huitlacoche

La Figura 8 muestra la matriz de correlación específica para Huitlacoche, analizando cómo las variables climáticas influyen en la incidencia de esta enfermedad.

Figura 8
Matriz de correlación para Huitlacoche



Interpretación de la matriz de correlación para Huitlacoche:

- Temperatura e incidencia ($r = -0.39$): Existe una correlación negativa moderada entre la temperatura y la incidencia de Huitlacoche. Esto sugiere que temperaturas más altas pueden reducir la incidencia de esta enfermedad.
- Humedad relativa e incidencia ($r = -0.3$): También hay una correlación negativa entre la humedad relativa y la incidencia de Huitlacoche, aunque es menos marcada que con la temperatura. Esto indica que un ambiente menos húmedo puede ser menos favorable para el desarrollo de Huitlacoche.
- Precipitación e incidencia ($r = -0.44$): La correlación negativa más fuerte se observa entre la precipitación y la incidencia de Huitlacoche. Esto podría significar que mayores niveles de precipitación reducen la incidencia de esta enfermedad, posiblemente debido a la interferencia con el ciclo de vida del patógeno.

- Temperatura y humedad relativa ($r=0.39$): La relación positiva moderada entre la temperatura y la humedad relativa indica que, en este contexto, aumentos en la temperatura pueden estar asociados con un ligero incremento en la humedad relativa.

Este análisis sugiere que condiciones climáticas secas y cálidas pueden reducir la incidencia de Huitlacoche, lo cual es útil para diseñar estrategias de manejo preventivo.

Correlación para roya del maíz

La Figura 9 presenta la matriz de correlación específica para roya del maíz, examinando cómo las variables climáticas afectan la incidencia de esta enfermedad.

Interpretación de la matriz de correlación para roya del maíz:

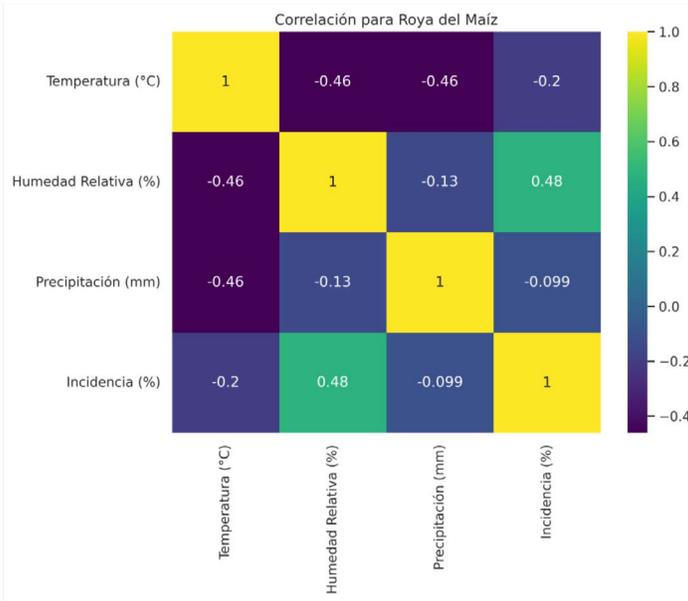
Temperatura e incidencia ($r = -0.2$): Existe una correlación negativa leve entre la temperatura y la incidencia de roya del maíz. Esto sugiere que temperaturas más altas pueden estar ligeramente asociadas con una reducción en la incidencia de esta enfermedad.

Humedad relativa e incidencia ($r = 0.48$): La correlación positiva más fuerte en esta matriz se observa entre la humedad relativa y la incidencia de roya del maíz. Esto indica que niveles más altos de humedad favorecen significativamente el desarrollo de esta enfermedad.

Precipitación e incidencia ($r = -0.099$): La relación entre la precipitación y la incidencia es muy débilmente negativa, sugiriendo que la cantidad de lluvia no tiene un impacto considerable en la incidencia de roya del maíz.

Temperatura y humedad relativa ($r = -0.46$): La relación negativa entre temperatura y humedad relativa sugiere que en este ambiente, un incremento en la temperatura tiende a estar acompañado de una disminución en la humedad relativa.

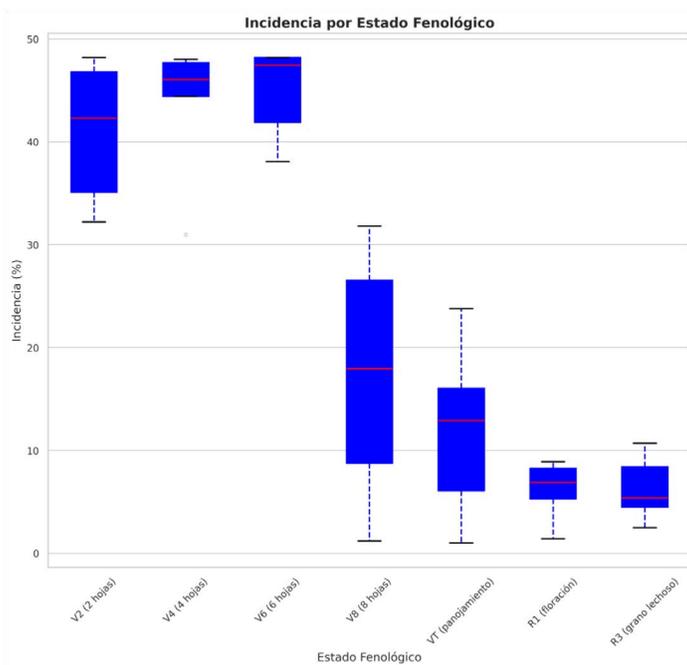
Figura 9
Matriz de correlación para Roya del Maíz



Este análisis indica que la roya del maíz prospera mejor en condiciones de alta humedad, lo que sugiere la necesidad de monitorear la humedad para controlar esta enfermedad.

Incidencia por estado fenológico

La Figura 10 muestra cómo la incidencia de plagas y enfermedades varía según el estado fenológico del cultivo de maíz. Se observa que las etapas tempranas de desarrollo, particularmente desde V2 (2 hojas) hasta V6 (6 hojas), presentan los niveles de incidencia más elevados. Esto sugiere que en estos primeros estadios de crecimiento, el cultivo es más vulnerable a la infestación de plagas como el gusano cogollero del maíz y el barrenador del tallo, lo que puede deberse a la menor fortaleza estructural y a la exposición directa de los tejidos tiernos de la planta.

Figura 10*Incidencia de plagas en función del estado fenológico del maíz*

La incidencia disminuye notablemente en las etapas más avanzadas, como VT (panojamiento) y R1 (floración), lo que indica una mayor resistencia del cultivo en estas fases, probablemente asociada a un desarrollo más robusto de la planta y a la reducción de tejidos jóvenes vulnerables. No obstante, es relevante notar que, aunque la incidencia es menor en las etapas reproductivas (como R3, grano lechoso), aún persiste un nivel de infestación que podría afectar la productividad final del cultivo si no se gestiona adecuadamente.

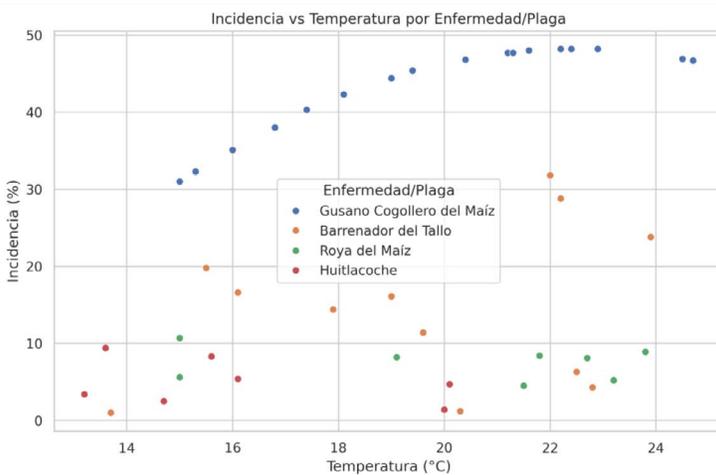
Este análisis sugiere la importancia de implementar medidas de control preventivas durante las etapas iniciales de desarrollo (V2 a V6), cuando el cultivo es más susceptible. El monitoreo intensivo y la aplicación de tratamientos fitosanitarios en estos estadios pueden ser estrategias efectivas para reducir significativamente las pérdidas en el rendimiento del cultivo, optimizando los recursos y mejorando la eficacia en el manejo de plagas y enfermedades.

Incidencia en función de temperatura y humedad

Los gráficos de dispersión (Figuras 11 y 12) ilustran la relación entre la incidencia de plagas y las variables climáticas, específicamente la temperatura y la humedad relativa, en el cultivo de maíz.

Figura 11

Relación entre la incidencia de plagas y la temperatura



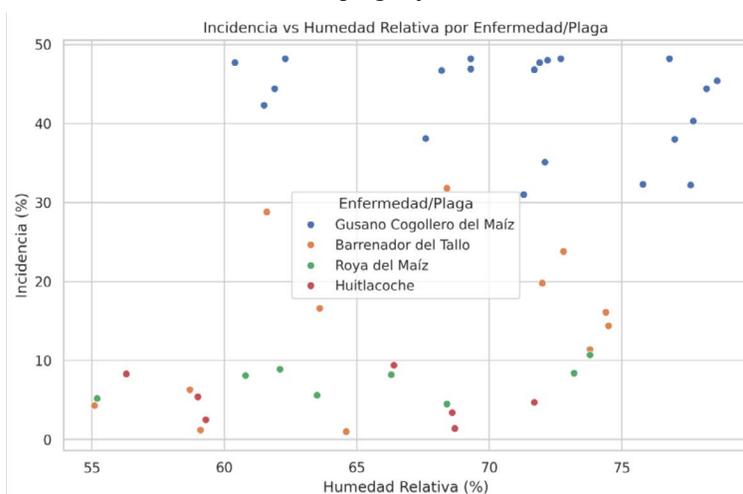
La Figura 11 revela un patrón claro de aumento en la incidencia del Gusano Cogollero del Maíz conforme se incrementa la temperatura, alcanzando los niveles más altos en temperaturas superiores a 20 °C. Este comportamiento sugiere que el Gusano Cogollero del Maíz es altamente sensible a las condiciones de temperatura, mostrando una mayor proliferación en climas cálidos. Esto podría explicarse porque las temperaturas elevadas aceleran el ciclo de vida de esta plaga, promoviendo una mayor actividad reproductiva y una expansión más rápida de su población.

En contraste, otras plagas y enfermedades como el barrenador del tallo, la roya del maíz y el huitlacoche muestran una respuesta menos marcada ante los incrementos de temperatura. Sus incidencias se mantienen relativamente estables o incluso decrecen ligeramente en el rango de 14 a 24°C. Este hallazgo sugiere que estas plagas tienen requerimientos térmicos distintos al gusano cogollero del maíz, lo que es relevante al diseñar estrategias de control específicas para cada tipo de plaga.

La Figura 12 muestra la relación entre la incidencia de plagas y la humedad relativa. En particular, se observa que la roya del maíz tiende a aumentar en condiciones de humedad relativa superiores al 70 %, lo que indica que esta enfermedad es favorecida en ambientes húmedos. Esto podría deberse a que la alta humedad facilita el desarrollo y la dispersión del patógeno causante de la roya del maíz, haciéndola más prevalente bajo estas condiciones.

Figure 1

Relación entre la incidencia de plagas y la humedad relativa



Estos resultados son esenciales para planificar intervenciones específicas de manejo fitosanitario. Dado que el gusano cogollero del maíz muestra una alta incidencia en temperaturas superiores a 20 °C y la roya del maíz se incrementa con altos niveles de humedad, el monitoreo de las condiciones climáticas podría ser una herramienta eficaz para anticipar brotes de estas plagas y optimizar las prácticas de control en función de los periodos de mayor riesgo.

Conclusiones

El análisis del impacto de las variables climáticas en la incidencia de plagas y enfermedades en el cultivo de maíz revela patrones significa-

tivos que permiten optimizar las estrategias de manejo fitosanitario de manera sostenible. Los resultados muestran que el gusano cogollero del maíz y la roya del maíz son altamente sensibles a las condiciones de temperatura y humedad relativa, respectivamente. En particular, se identificó que el gusano cogollero del maíz incrementa su incidencia en climas cálidos, mientras que la roya del maíz prospera en ambientes con alta humedad relativa. Estas observaciones sugieren que las condiciones climáticas favorables para el desarrollo de estas plagas y enfermedades pueden anticiparse mediante un monitoreo constante de temperatura y humedad, permitiendo una respuesta proactiva que minimice el uso de pesticidas y otros insumos agroquímicos.

Este estudio destaca la importancia de un manejo adaptativo de plagas, donde las prácticas de control se alineen no solo con la biología de las plagas, sino también con los factores climáticos específicos que influyen en su proliferación. Esto es fundamental para establecer un sistema de manejo integrado de plagas (MIP) que reduzca el impacto ambiental y fomente la sostenibilidad del cultivo de maíz. En lugar de recurrir a medidas de control generalizadas y continuas, los hallazgos sugieren que una estrategia de intervención focalizada, basada en la vigilancia climática, puede mejorar significativamente la efectividad de las prácticas fitosanitarias, optimizando los recursos y minimizando el daño ecológico.

Además, el estudio de las variaciones estacionales en la incidencia de plagas y enfermedades permite identificar periodos de alto riesgo, especialmente en las etapas iniciales del desarrollo del cultivo. Esta información es clave para el diseño de programas preventivos que fortalezcan la resiliencia del maíz frente a las condiciones ambientales cambiantes. A medida que el cambio climático genera nuevas fluctuaciones en los patrones de temperatura y humedad, contar con un modelo de manejo que incorpore estas variables se convierte en un componente esencial para la sostenibilidad de la agricultura.

Finalmente, el presente análisis aporta una base sólida para futuras investigaciones en el ámbito de la agroecología y el manejo de plagas, enmarcadas en el contexto de la sostenibilidad y la adaptación al cambio climático. La integración de tecnologías de monitoreo climático y el desarrollo de herramientas predictivas basadas en inteligencia artificial

pueden potenciar aún más la precisión y efectividad de las estrategias de manejo, posicionando al cultivo de maíz como un sistema agrícola que no solo responde a las exigencias productivas, sino que también contribuye activamente a la preservación del medioambiente.

Referencias

- Altieri, M. A., & Toledo, V. M. (2011). The agroecological revolution in Latin America: Rescuing nature, ensuring food sovereignty and empowering peasants. *Journal of Peasant Studies*, 38(3), 587-612. <https://doi.org/10.1080/03066150.2011.582947>
- Brzozowski, L., & Mazourek, M. (2018). A Sustainable Agricultural Future Relies on the Transition to Organic Agroecological Pest Management. *Sustainability*, 10(6), 2023. <https://doi.org/10.3390/su10062023>
- Cairns, J. E., Sonder, K., Zaidi, P. H., Verhulst, N., Mahuku, G., Babu, R., Nair, S. K., Das, B., Govaerts, B., Vinayan, M. T., Rashid, Z., Noor, J. J., Devi, P., San Vicente, F., & Prasanna, B. M. (2012). Maize Production in a Changing Climate. En *Advances in Agronomy* (Vol. 114, pp. 1-58). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394275-3.00006-7>
- De Lange, E. S., Balmer, D., Mauch-Mani, B., & Turlings, T. C. J. (2014). Insect and pathogen attack and resistance in maize and its wild ancestors, the teosintes. *New Phytologist*, 204(2), 329-341. <https://doi.org/10.1111/nph.13005>
- Dövényi-Nagy, T., Rácz, C., Molnár, K., Bakó, K., Szláma, Z., Józwiak, Á., Farkas, Z., Pócsi, I., & Dobos, A. C. (2020). Pre-Harvest Modelling and Mitigation of Aflatoxins in Maize in a Changing Climatic Environment—A Review. *Toxins*, 12(12), 768. <https://doi.org/10.3390/toxins12120768>
- Gautam, D., Shrestha, B., & Subedi, B. (2021). Bio-fortified maize: Cornerstone in plant breeding to combat hidden hunger in developing countries. *Archives of Agriculture and Environmental Science*, 6(1), 100-107. <https://doi.org/10.26832/24566632.2021.0601013>
- Guillen-Cruz, G., Torres-Arreola, R., Sanchez-Mejia, Z., & Flores-Rentieria, D. (2022). The effect of conventional and sustainable agricultural management practices on carbon and water fluxes in a Mexican semi-arid region. *PeerJ*, 10, e14542. <https://doi.org/10.7717/peerj.14542>

- Juroszek, P., & Von Tiedemann, A. (2013). Plant pathogens, insect pests and weeds in a changing global climate: A review of approaches, challenges, research gaps, key studies and concepts. *The Journal of Agricultural Science*, 151(2), 163-188. <https://doi.org/10.1017/S0021859612000500>
- Li, J. (2024). The Spread of Maize from Southern Mexico: Genetic and Archaeological Perspectives. *Maize Genomics and Genetics*. <https://doi.org/10.5376/mgg.2024.15.0009>
- Savary, S., Nelson, A., Sparks, A. H., Willocquet, L., Duveiller, E., Mahuku, G., Forbes, G., Garrett, K. A., Hodson, D., Padgham, J., Pande, S., Sharma, M., Yuen, J., & Djurle, A. (2011). International Agricultural Research Tackling the Effects of Global and Climate Changes on Plant Diseases in the Developing World. *Plant Disease*, 95(10), 1204-1216. <https://doi.org/10.1094/PDIS-04-11-0316>
- Skendžić, S., Zovko, M., Živković, I. P., Lešić, V., & Lemić, D. (2021). The Impact of Climate Change on Agricultural Insect Pests. *Insects*, 12(5), 440. <https://doi.org/10.3390/insects12050440>
- Waqas, M. A., Wang, X., Zafar, S. A., Noor, M. A., Hussain, H. A., Azher Nawaz, M., & Farooq, M. (2021). Thermal Stresses in Maize: Effects and Management Strategies. *Plants*, 10(2), 293. <https://doi.org/10.3390/plants10020293>
- Wu, F., Bhatnagar, D., Bui-Klimke, T., Carbone, I., Hellmich, R., Munkvold, G., Paul, P., Payne, G., & Takle, E. (2011). Climate change impacts on mycotoxin risks in US maize. *World Mycotoxin Journal*, 4(1), 79-93. <https://doi.org/10.3920/WMJ2010.1246>
- Yan, X.-R., Wang, Z.-Y., Feng, S.-Q., Zhao, Z.-H., & Li, Z.-H. (2022). Impact of Temperature Change on the Fall Armyworm, *Spodoptera frugiperda* under Global Climate Change. *Insects*, 13(11), 981. <https://doi.org/10.3390/insects13110981>