



Methodological architecture of territorial intelligence for the delimitation of potential epidemiological corridors of the New World screwworm *Cochliomyia hominivorax* in central Mexico

Arquitectura metodológica de inteligencia territorial para la delimitación de corredores epidemiológicos potenciales del gusano barrenador del ganado *Cochliomyia hominivorax* en el centro de México

Eduardo Sánchez Jiménez¹  

¹ Universidad Politécnica de Atlautla. Atlautla, México.

Recibido: 18-04-2026 | Revisado: 29-06-2026 | Aceptado: 26-07-2026 | Publicado: 30-07-2026

Autor de correspondencia: Eduardo Sánchez Jiménez 

ABSTRACT

Objective: To develop a methodological architecture of territorial intelligence to integrate agroclimatic, epidemiological and territorial information, with the purpose of delimiting potential epidemiological corridors of the cattle screwworm *Cochliomyia hominivorax* in the Region of the Volcanoes, State of Mexico. **Methodology:** An observational and retrospective design was used based on three sources of information: official outbreak records from SENASICA and WOA, data from the GORRIÓN Agroclimatic Network and territorial connectivity variables. The architecture integrated four complementary components: the GORRIÓN Borer Risk Index, the Epidemiological Proximity Index, the Territorial Connectivity Index and the Integrated Territorial Risk, combined through a multi-criteria analysis scheme within a geographic information system. **Results:** The integration of the variables allowed the identification of potential epidemiological corridors, understood as spatial hypotheses in which favorable agroclimatic conditions, epidemiological pressure and high territorial connectivity converge. The identified corridors do not represent confirmed dispersal routes, but rather priority areas to strengthen preventive surveillance, guide animal health monitoring, and optimize resource allocation. **Conclusion:** The proposed architecture constitutes a reproducible methodological basis for integrating multiple sources of information in territorial intelligence systems applied to animal health surveillance. It can also contribute to the preventive identification of risk areas and be transferred, with the corresponding adaptations, to the study of other emerging animal diseases.

Keywords: *Cochliomyia hominivorax*; territorial intelligence; animal health surveillance; spatial epidemiology; Multi-criteria evaluation.

RESUMEN

Objetivo: Desarrollar una arquitectura metodológica de inteligencia territorial para integrar información agroclimática, epidemiológica y territorial, con el propósito de delimitar corredores epidemiológicos potenciales del gusano barrenador del ganado *Cochliomyia hominivorax* en la Región de los Volcanes, Estado de México. **Metodología:** Se empleó un diseño observacional y retrospectivo basado en tres fuentes de información: registros oficiales de brotes de SENASICA y WOA, datos de la Red Agroclimática GORRIÓN y variables de conectividad territorial. La arquitectura integró cuatro componentes complementarios: el Índice de Riesgo Barrenador GORRIÓN, el Índice de Proximidad Epidemiológica, el Índice de Conectividad Territorial y el Riesgo Territorial Integrado, combinados mediante un esquema de análisis multicriterio dentro de un sistema de información geográfica. **Resultados:** La integración de las variables permitió identificar corredores epidemiológicos potenciales, entendidos como hipótesis espaciales en las que convergen condiciones agroclimáticas favorables, presión epidemiológica y alta conectividad territorial. Los corredores identificados no representan rutas confirmadas de dispersión, sino áreas prioritarias para fortalecer la vigilancia preventiva, orientar el monitoreo zoonosanitario y optimizar la asignación de recursos. **Conclusión:** La arquitectura propuesta constituye una base metodológica reproducible para integrar múltiples fuentes de información en sistemas de inteligencia territorial aplicados a la vigilancia zoonosanitaria. Asimismo, puede contribuir a la identificación preventiva de zonas de riesgo y ser transferida, con las adaptaciones correspondientes, al estudio de otras enfermedades animales emergentes.

Palabras clave: *Cochliomyia hominivorax*; inteligencia territorial; vigilancia zoonosanitaria; epidemiología espacial; evaluación multicriterio.

INTRODUCCIÓN

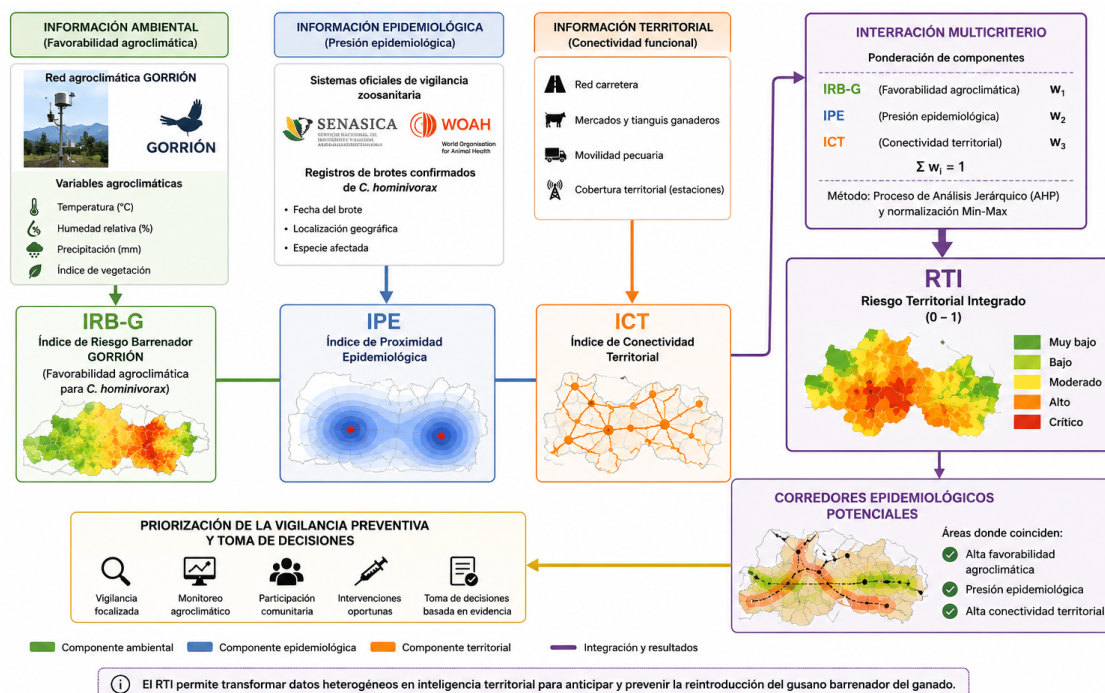
El gusano barrenador del ganado (*Cochliomyia hominivorax* Coquerel, 1858) constituye uno de los ectoparásitos de mayor impacto sanitario, económico y productivo para la ganadería del continente americano. Sus larvas se desarrollan exclusivamente sobre tejido vivo de vertebrados homeotermos, ocasionando miasis traumáticas que comprometen el bienestar animal, disminuyen la productividad pecuaria y, en casos severos, provocan la muerte del hospedador^{1,2}. Además de sus repercusiones en la producción animal, la presencia de casos humanos recientes en México refuerza la necesidad de abordar su vigilancia desde un enfoque de Una Salud (One Health), que reconozca la interacción entre la salud animal, la salud humana y las condiciones ambientales.

Durante la segunda mitad del siglo XX, la aplicación de la Técnica del Insecto Estéril, complementada con campañas zoonosanitarias y vigilancia epidemiológica, permitió erradicar la especie de México y gran parte de Centroamérica³. Sin embargo, la reaparición de brotes en el sur de México y Centroamérica demuestra que la erradicación no constituye una condición permanente y que la prevención requiere sistemas de vigilancia con capacidad para anticipar territorios prioritarios antes de la aparición de nuevos focos.

Diversas investigaciones han demostrado que la distribución potencial de *C. hominivorax* está estrechamente relacionada con variables ambientales como temperatura, humedad y precipitación. Mediante modelos de nicho ecológico, Moo-Llanes et al. [2], identificaron amplias regiones del territorio mexicano con condiciones favorables para el establecimiento de la especie y señalaron que dichas áreas podrían modificarse bajo escenarios de cambio climático. No obstante, la favorabilidad agroclimática representa únicamente una condición ecológica para el desarrollo del insecto y no explica por sí sola la ocurrencia de infestaciones. La presencia de hospedadores susceptibles, la proximidad a brotes activos y la conectividad territorial intervienen de manera simultánea en la dinámica epidemiológica [4,5].

De forma paralela, los sistemas oficiales de vigilancia coordinados por el Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (SENASICA) y la World Organisation for Animal Health (WOAH) proporcionan información confiable sobre la distribución espacial y temporal de brotes confirmados^{6-8,18}. Sin embargo, estos sistemas están orientados principalmente al registro y seguimiento de eventos ocurridos, por lo que existe la oportunidad de fortalecer su capacidad preventiva mediante la integración de información ambiental y territorial.

Figura 1. Arquitectura conceptual del Riesgo territorial Integrado para la vigilancia preventiva del gusano barrenador del ganado



Fuente: elaboración propia, trabajo de campo 2026.

En los últimos años, la epidemiología espacial ha incorporado herramientas como los Sistemas de Información Geográfica, el monitoreo ambiental en tiempo real y los modelos multicriterio para comprender la interacción entre procesos ecológicos, movilidad animal y organización del territorio^{9,10}. Bajo esta perspectiva, el riesgo sanitario deja de interpretarse exclusivamente como la presencia de un agente biológico y pasa a entenderse como el resultado de la convergencia de múltiples factores ambientales, epidemiológicos y territoriales.

En este contexto, el Proyecto GORRIÓN ha desarrollado una red comunitaria de monitoreo agroclimático orientada a fortalecer la inteligencia territorial mediante información ambiental generada en tiempo real. Como antecedente de esta línea de investigación, Sánchez Jiménez [11] propuso el Índice de Riesgo Barrenador GORRIÓN (IRB-G), un modelo ecoagroclimático diseñado para estimar la favorabilidad ambiental para *C. hominivorax*. El IRB-G distingue explícitamente entre favorabilidad agroclimática y riesgo epidemiológico, estableciendo que las condiciones meteorológicas constituyen únicamente uno de los componentes que intervienen en el establecimiento del insecto.

A pesar de estos avances, persiste un vacío metodológico. La mayor parte de las investigaciones disponibles analiza de manera independiente la distribución potencial de la especie, la localización de brotes o las condiciones del territorio. Son escasas las propuestas que integran simultáneamente información agroclimática, vigilancia epidemiológica oficial y conectividad territorial dentro de un mismo marco analítico para apoyar la vigilancia preventiva.

Con el propósito de contribuir a esta línea de investigación, el presente trabajo propone una arquitectura metodológica integrada por cuatro componentes complementarios: el Índice de Riesgo Barrenador GORRIÓN (IRB-G), que representa la favorabilidad agroclimática; el Índice de Proximidad Epidemiológica (IPE), que incorpora la influencia espacial y temporal de brotes oficialmente confirmados; el Índice de Conectividad Territorial (ICT), que representa la interacción potencial derivada de la infraestructura, la movilidad pecuaria y la continuidad territorial; y el Riesgo Territorial Integrado (RTI), obtenido mediante la integración multicriterio de los tres componentes anteriores.

La Región de los Volcanes del Estado de México fue seleccionada como caso de estudio debido a su elevada heterogeneidad ambiental, intensa actividad agropecuaria y conectividad con regiones estratégicas del centro del país. Asimismo, constituye el ámbito de operación de la Red Agroclimática GORRIÓN, lo que permite disponer de información meteorológica de alta resolución para integrar la dimensión ambiental con los registros oficiales de vigilancia epidemiológica.

En consecuencia, el objetivo de esta investigación es desarrollar y describir una arquitectura metodológica de inteligencia territorial que integre información agroclimática, epidemiológica y territorial para delimitar corredores epidemiológicos potenciales de riesgo del gusano barrenador del ganado en el centro de México.

Los Corredores Epidemiológicos Potenciales (CEP) identificados mediante esta arquitectura se definen como territorios donde convergen condiciones ambientales favorables, proximidad a brotes oficialmente confirmados y elevada conectividad funcional. En este estudio, dichos corredores deben interpretarse como hipótesis espaciales para orientar la priorización de acciones de vigilancia preventiva, y no como rutas confirmadas de dispersión ni como predicciones epidemiológicas validadas. En consecuencia, el RTI se plantea como una propuesta metodológica susceptible de calibración y validación mediante series temporales más extensas, nuevos registros epidemiológicos y análisis de sensibilidad.

METODOLOGÍA

Diseño del estudio

La presente investigación corresponde a un estudio metodológico de carácter observacional, retrospectivo y espacial, orientado al desarrollo de una herramienta de inteligencia territorial para la vigilancia preventiva del vector del gusano barrenador del ganado (*Cochliomyia hominivorax*) en el centro de México. El estudio integra información proveniente de tres fuentes independientes: i) vigilancia epidemiológica oficial, ii) monitoreo agroclimático comunitario y iii) variables de conectividad territorial.

La integración de estas fuentes permitió construir un modelo multicriterio destinado a identificar corredores epidemiológicos potenciales de riesgo, entendidos como territorios donde convergen condiciones ambientales favorables, cercanía a focos activos y elevada conectividad funcional.

El enfoque metodológico se fundamenta en los principios de la epidemiología espacial y la inteligencia territorial, los cuales reconocen que la distribución de las enfermedades depende de procesos ecológicos, ambientales y socioeconómicos que interactúan simultáneamente sobre el territorio^{9,10}.

Área de estudio

El estudio se desarrolló utilizando como territorio de referencia la Región de los Volcanes, localizada en el oriente del Estado de México. Esta región comprende principalmente los municipios de Amecameca, Atlautla, Ecatzingo, Ozumba y Tepetlixpa, caracterizados por sistemas campesinos de montaña, gradientes altitudinales superiores a 1,800 m s.n.m., agricultura de temporal, producción pecuaria de pequeña escala y una intensa interacción territorial con los estados de Morelos, Puebla y la Zona Metropolitana del Valle de México. La región constituye además el ámbito de operación de la Red Agroclimática GORRIÓN, integrada por estaciones meteorológicas automáticas que generan información ambiental continua para apoyar procesos de vigilancia territorial.

Fuentes de información

Los registros oficiales de brotes de *Cochliomyia hominivorax* fueron obtenidos del tablero nacional del Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria [6,7] y del sistema internacional World Animal Health Information System [8,18], los cuales proporcionaron la ubicación geográfica de brotes confirmados, fecha de ocurrencia y especie afectada. Las variables agroclimáticas fueron retomadas mediante la estación GORRIÓN IOZUMB2, operada por la Universidad Politécnica de Atlautla (Proyecto GORRIÓN, 2026), cuyos registros incluyen temperatura del aire, humedad relativa, precipitación acumulada, velocidad del viento, principalmente.

Para este estudio se emplearon como principal fuente los registros de la estación GORRIÓN-01, ubicada en Atlautla. La tercera fuente incorporó información territorial derivada de infraestructura carretera, continuidad de áreas pecuarias, centros regionales de comercialización ganadera y patrones generales de movilidad pecuaria obtenidos mediante cartografía oficial y análisis geoespacial.

Arquitectura metodológica

La arquitectura metodológica propuesta se estructuró mediante cuatro componentes complementarios que representan dimensiones diferentes pero interdependientes del riesgo territorial asociado a *Cochliomyia hominivorax*. En lugar de asumir que una sola variable explica la distribución potencial del insecto, la propuesta integra información ambiental, epidemiológica y territorial dentro de un esquema jerárquico de evaluación multicriterio.

Se diseñó una arquitectura jerárquica integrada por cuatro índices complementarios. El primero corresponde al Índice de Riesgo Barrenador GORRIÓN (IRB-G), cuyo propósito es estimar la favorabilidad agroclimática para el establecimiento del insecto. Este índice sintetiza la influencia de variables meteorológicas sobre el desarrollo biológico de *C. hominivorax* y representa exclusivamente la dimensión ambiental del riesgo¹¹.

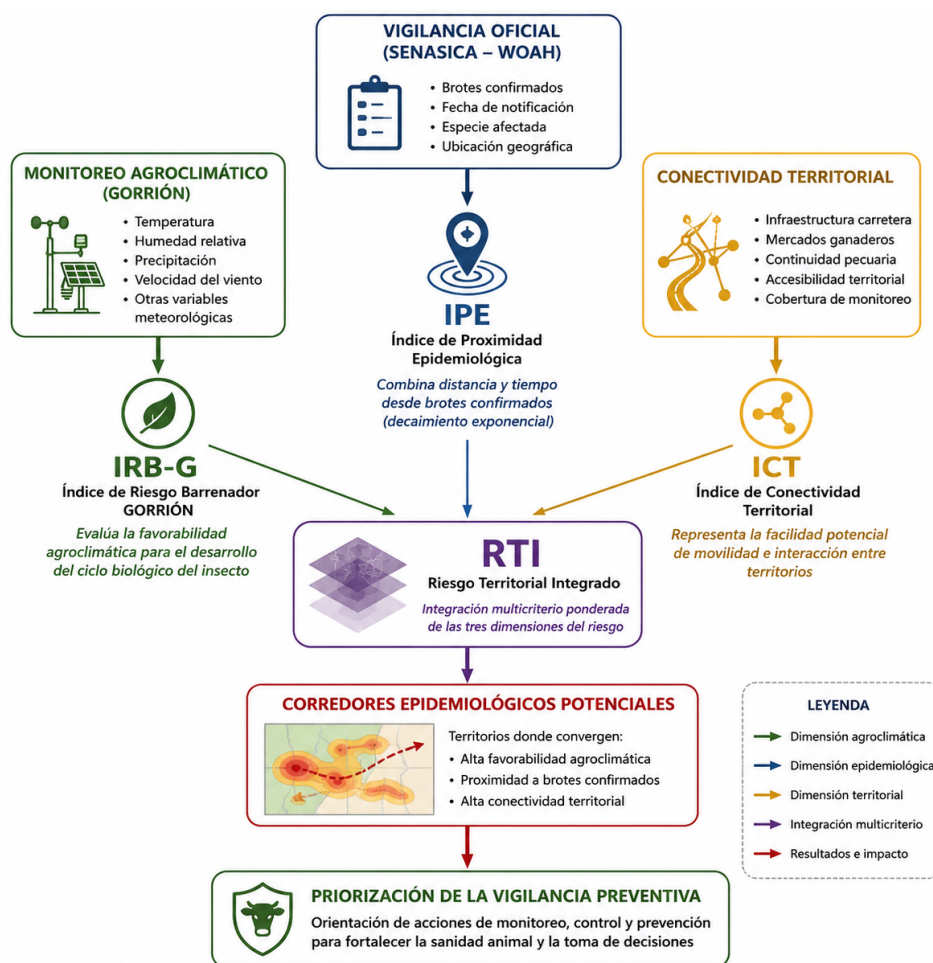
El segundo componente corresponde al Índice de Proximidad Epidemiológica (IPE), diseñado para cuantificar la influencia espacial de los brotes oficialmente confirmados. El índice considera simultáneamente la distancia entre el territorio de estudio y los focos activos, así como la antigüedad de los registros epidemiológicos, otorgando mayor peso a eventos recientes y cercanos. El tercer componente corresponde al Índice de Conectividad Territorial (ICT), cuyo objetivo es representar la facilidad potencial de interacción entre territorios mediante infraestructura vial, continuidad del paisaje pecuario, mercados ganaderos y movilidad regional.

En conjunto, estos componentes conforman una arquitectura metodológica de inteligencia territorial orientada a integrar información proveniente de distintas fuentes dentro de un procedimiento reproducible para la evaluación espacial del riesgo. Su propósito no consiste en sustituir los sistemas oficiales de vigilancia, sino proporcionar un marco metodológico que fortalezca la identificación de territorios prioritarios para el monitoreo preventivo.

Formulación matemática de los índices

Con el propósito de garantizar la reproducibilidad del modelo propuesto y facilitar su aplicación en otros contextos territoriales, cada uno de los índices que integran la arquitectura metodológica fue expresado mediante formulaciones matemáticas específicas.

Figura 2. Arquitectura RTI para la vigilancia preventiva del gusano barrenador del ganado



Fuente: elaboración propia, trabajo de campo 2026.

Estas ecuaciones representan los procesos ecológicos, epidemiológicos y territoriales considerados en el estudio y permiten transformar información proveniente de diferentes fuentes en indicadores normalizados dentro del intervalo^{0,1}.

Posteriormente, dichos indicadores fueron integrados mediante un esquema multicriterio para construir el Riesgo Territorial Integrado (RTI). La formulación matemática responde al principio de descomposición del riesgo en componentes independientes pero complementarios, evitando redundancias entre variables y facilitando futuras calibraciones o adaptaciones del modelo para otros sistemas de vigilancia zoonosanitaria, para contextos y situaciones específicas, con el propósito de que estos instrumentos puedan ser adaptados a otras realidades.

El IRB-G representa la favorabilidad agroclimática del territorio para el desarrollo del ciclo biológico de *Cochliomyia hominivorax*. El índice integra variables ambientales obtenidas por la Red Agroclimática GORRIÓN, incluyendo temperatura media, humedad relativa, precipitación acumulada y otros factores derivados del comportamiento meteorológico local. Cada variable fue normalizada y ponderada para generar una superficie continua de idoneidad ambiental expresada entre 0 (muy baja favorabilidad) y 1 (muy alta favorabilidad). La formulación general del índice se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$\boxed{IRB_G = f(T, HR, P, \dots)}$$

Por otro lado, el Índice de Proximidad Epidemiológica (IPE) cuantifica la presión epidemiológica ejercida por los brotes oficialmente confirmados de *Cochliomyia hominivorax*. La influencia de cada brote disminuye progresivamente conforme aumenta la distancia respecto al foco y el tiempo transcurrido desde su notificación, siguiendo una función de decaimiento exponencial ampliamente utilizada en epidemiología espacial⁹. La formulación general se presenta en la siguiente ecuación:

$$\boxed{IPE = e^{-\lambda d} \cdot e^{-\mu t}}$$

Otro de los Índices de Conectividad Territorial (ICT) representa la capacidad funcional del territorio para facilitar la movilidad potencial del riesgo mediante la integración de infraestructura carretera, redes de comercialización pecuaria, accesibilidad territorial y cobertura espacial de monitoreo. Cada componente fue normalizado y ponderado para construir un índice continuo entre 0 y 1. La formulación general corresponde a la siguiente ecuación:

$$\boxed{ICT = \sum_i w_i C_i}$$

Integración espacial

Todas las variables fueron georreferenciadas dentro de un Sistema de Información Geográfica (SIG). Los registros epidemiológicos fueron asociados con su ubicación espacial, mientras que las estaciones agroclimáticas proporcionaron información ambiental continua para cada periodo analizado. La conectividad territorial fue representada mediante análisis espacial considerando la proximidad a corredores carreteros, continuidad territorial de sistemas pecuarios y zonas de interacción regional. Posteriormente, todas las variables fueron normalizadas en una escala entre 0 y 1 con el propósito de permitir su integración dentro del modelo multicriterio.

Construcción del Riesgo Territorial Integrado (RTI)

La integración metodológica siguió un enfoque aditivo ponderado ampliamente utilizado en modelos de evaluación multicriterio¹². En lugar de multiplicar los índices, se optó por una combinación lineal ponderada debido a que cada componente representa una dimensión independiente del riesgo. El RTI integra, favorabilidad agroclimática (IRB-G), proximidad epidemiológica (IPE) y conectividad territorial (ICT). Las ponderaciones iniciales fueron definidas con base en criterios epidemiológicos y podrán ser refinadas mediante procesos posteriores de calibración y análisis de sensibilidad. En esta investigación el modelo debe interpretarse como una aproximación metodológica para la priorización territorial y no como un modelo probabilístico de infestación. Finalmente, el RTI integra los tres índices anteriores mediante un procedimiento multicriterio basado en ponderaciones normalizadas. La ecuación general es:

$$\boxed{RTI = w_1(IRB_G) + w_2(IPE) + w_3(ICT)}$$

$$\text{sujeeto a: } \boxed{\sum w_i = 1}$$

Donde w_1 , w_2 y w_3 representan las ponderaciones asignadas a cada componente del modelo. Dichas ponderaciones fueron definidas con base en criterios epidemiológicos y de inteligencia territorial, asegurando que la suma de los pesos fuera igual a uno para conservar la escala normalizada del índice integrado. La combinación lineal ponderada fue seleccionada debido a que cada índice representa una dimensión conceptualmente independiente del riesgo. Esta estrategia permite modificar futuras ponderaciones conforme se disponga de nuevos datos, sin alterar la estructura general de la arquitectura metodológica.

Clasificación del riesgo

Con fines operativos, el Riesgo Territorial Integrado fue clasificado en cuatro categorías: Bajo, Moderado, Alto y Crítico. Esta clasificación permite traducir los resultados del modelo en información fácilmente interpretable para instituciones responsables de la vigilancia zoonosanitaria y para redes comunitarias de monitoreo. Es importante señalar que dichas categorías representan niveles relativos de priorización territorial y no probabilidades absolutas de ocurrencia de brotes.

Validación conceptual

La evaluación del modelo correspondió a una validación metodológica basada en la consistencia conceptual de la arquitectura propuesta. En consecuencia, el objetivo de esta investigación no fue validar la capacidad predictiva del RTI, sino evaluar la coherencia lógica de la integración entre información agroclimática, epidemiológica y territorial para delimitar corredores epidemiológicos potenciales susceptibles de orientar la vigilancia preventiva.

La validación del modelo se realizó mediante consistencia conceptual entre los cuatro componentes que integran la arquitectura metodológica. A diferencia de modelos puramente estadísticos, la propuesta desarrollada en esta investigación tiene un carácter exploratorio y busca establecer un marco de inteligencia territorial susceptible de ser calibrado conforme se disponga de nuevos registros epidemiológicos y series temporales provenientes de la Red Agroclimática GORRIÓN o de algunas otras existentes en territorios potenciales.

Tabla 1. Variables utilizadas para la investigación

RTI	Nivel	Acción recomendada
0–0.25	Bajo	Vigilancia rutinaria
0.26–0.50	Moderado	Monitoreo reforzado
0.51–0.75	Alto	Vigilancia intensiva
>0.75	Crítico	Respuesta inmediata

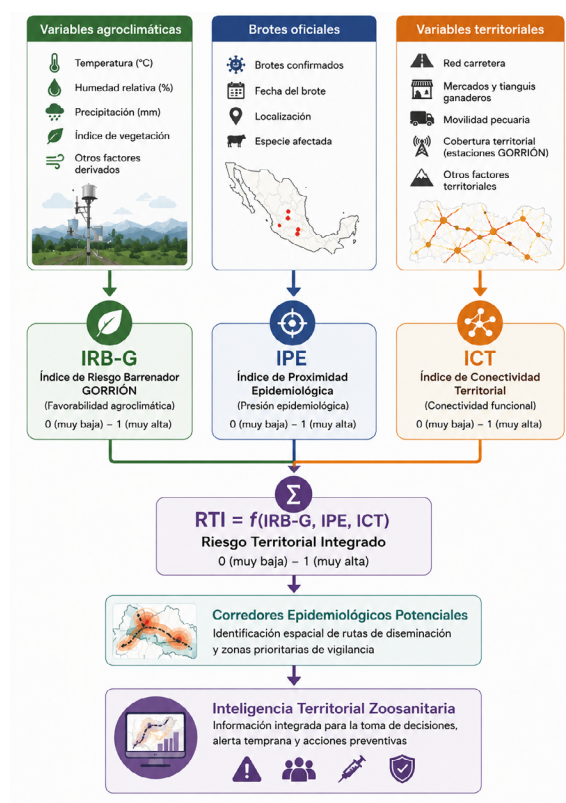
Fuente: elaboración propia, trabajo de campo 2026.

Bajo este enfoque, el estudio no pretende demostrar rutas reales de dispersión del gusano barrenador, sino identificar corredores epidemiológicos potenciales donde convergen condiciones ambientales favorables, proximidad a focos oficiales y elevada conectividad territorial.

Estos corredores constituyen hipótesis espaciales que permiten orientar acciones preventivas de vigilancia y optimizar la asignación de recursos institucionales. En consecuencia, el modelo se concibe como una herramienta complementaria para los sistemas oficiales de vigilancia, fortaleciendo la capacidad anticipatoria mediante la integración de información agroclimática, epidemiológica y territorial dentro de un marco de inteligencia territorial aplicable a enfermedades emergentes y reemergentes de importancia agropecuaria.

La principal innovación metodológica de esta investigación consiste en proponer una arquitectura de evaluación multicriterio del riesgo territorial, estructurada en cuatro componentes complementarios: el Índice de Riesgo Barrenador GORRIÓN (IRB-G), el Índice de Proximidad Epidemiológica (IPE), el Índice de Conectividad Territorial (ICT) y el Riesgo Territorial Integrado (RTI). Esta arquitectura integra información agroclimática, epidemiológica y territorial dentro de un procedimiento reproducible de inteligencia territorial orientado a fortalecer la vigilancia preventiva del gusano barrenador del ganado. Más que desarrollar un nuevo índice de riesgo, la propuesta establece un marco metodológico susceptible de adaptación, calibración y validación para diferentes contextos epidemiológicos y territoriales.

Figura 3. Arquitectura matemática del modelo RTI



Fuente. Elaboración propia, con base en trabajo de campo 2026.

RESULTADOS

Favorabilidad agroclimática para el establecimiento de *Cochliomyia hominivorax*

La integración de la información meteorológica proveniente de la Red Agroclimática GORRIÓN permitió identificar la distribución espacial de la favorabilidad ambiental para *Cochliomyia hominivorax* en la Región de los Volcanes mediante el Índice de Riesgo Barrenador GORRIÓN (IRB-G). A diferencia de los modelos tradicionales de distribución potencial, el IRB-G utiliza información agroclimática registrada en tiempo real, lo que proporciona una representación dinámica de las condiciones ambientales que favorecen el desarrollo del ciclo biológico del insecto.

Los resultados muestran que la favorabilidad agroclimática presenta una elevada variabilidad espaciotemporal asociada principalmente a cambios en la temperatura, humedad relativa, precipitación y velocidad del viento. Esta variabilidad refleja la heterogeneidad ambiental característica de los sistemas campesinos de montaña del centro de México, donde pequeños cambios altitudinales producen diferencias importantes en los microclimas locales. Desde una perspectiva epidemiológica, este comportamiento confirma que la favorabilidad ambiental constituye un proceso dinámico y no una condición permanente del territorio. En consecuencia, un mismo sitio puede transitar entre escenarios de bajo y alto riesgo ambiental en función de la evolución de las condiciones meteorológicas.

Este comportamiento coincide con estudios recientes que demuestran que el desarrollo larvario, la supervivencia de los adultos y la actividad reproductiva de *C. hominivorax* responden estrechamente a la variabilidad climática². Un aspecto relevante del IRB-G es que su interpretación evita establecer una relación causal directa entre clima e infestación. El índice únicamente representa el grado de favorabilidad ambiental para el establecimiento del insecto y no la ocurrencia de brotes. Esta distinción metodológica constituye una diferencia importante respecto a numerosos estudios de nicho ecológico, donde frecuentemente la favorabilidad ambiental es interpretada como riesgo epidemiológico.

En concordancia con Hall y Wall (1995), el desarrollo de la enfermedad requiere además la interacción de hospedadores susceptibles, heridas abiertas, densidad poblacional del insecto y procesos de dispersión espacial. Los resultados obtenidos respaldan la propuesta metodológica desarrollada por Sánchez Jiménez¹¹, quien plantea que la información agroclimática debe entenderse como la primera dimensión dentro de un sistema integral de inteligencia territorial y no como un predictor independiente de infestación.

Distribución espacial de la proximidad epidemiológica

La incorporación de registros oficiales provenientes de SENASICA y WOAHP permitió construir el Índice de Proximidad Epidemiológica (IPE), cuyo objetivo consiste en representar la influencia espacial ejercida por los focos oficialmente confirmados sobre el territorio de estudio. A diferencia de los mapas convencionales de casos, el IPE incorpora simultáneamente la distancia geográfica entre los brotes y el área analizada, así como la temporalidad de los registros epidemiológicos.

Como resultado, los focos recientes ejercen una influencia mayor que aquellos registrados meses atrás, permitiendo representar la dinámica cambiante de la presión epidemiológica. Los análisis espaciales muestran la existencia de un gradiente continuo de influencia epidemiológica alrededor de los focos activos. En lugar de observar fronteras abruptas entre zonas de riesgo y zonas libres, los resultados evidencian una disminución progresiva de la influencia epidemiológica conforme aumenta la distancia respecto a los brotes confirmados.

Este comportamiento coincide con principios ampliamente documentados en epidemiología espacial, donde la intensidad de la interacción entre territorios disminuye con la distancia, aunque nunca desaparece completamente⁹. Asimismo, el modelo permite incorporar nuevos brotes conforme son reportados oficialmente, generando una actualización dinámica del riesgo territorial. Los resultados también muestran que la utilización exclusiva de mapas de casos puede conducir a una subestimación del riesgo en territorios vecinos que aún no presentan infestaciones confirmadas, pero mantienen una elevada presión epidemiológica derivada de su proximidad espacial. Bajo esta perspectiva, el IPE constituye una herramienta complementaria para fortalecer la vigilancia preventiva antes de la aparición de nuevos casos.

Conectividad territorial e identificación de corredores funcionales

El análisis de conectividad territorial permitió incorporar una dimensión frecuentemente ausente en los modelos tradicionales de vigilancia del gusano barrenador.

Mientras la mayoría de las investigaciones se concentran en la distribución ambiental del insecto, el Índice de Conectividad Territorial (ICT) considera la estructura funcional del territorio mediante variables relacionadas con infraestructura carretera, continuidad del paisaje agropecuario, mercados pecuarios y movilidad regional. Los resultados indican que la conectividad territorial no presenta una distribución homogénea.

Por el contrario, se identifican zonas donde convergen múltiples elementos que favorecen la interacción entre unidades de producción pecuaria. Estos espacios corresponden principalmente a corredores carreteros regionales y áreas de intensa actividad comercial. Diversos autores han señalado que la conectividad constituye uno de los principales determinantes de la propagación de enfermedades infecciosas debido a que incrementa la frecuencia de interacción entre poblaciones susceptibles^{13,10}.

En este sentido, el ICT no pretende representar la dispersión biológica del insecto, sino la capacidad estructural del territorio para facilitar procesos de interacción epidemiológica. Los resultados obtenidos muestran que la incorporación de esta dimensión modifica sustancialmente la interpretación del riesgo territorial. Existen sectores con elevada favorabilidad agroclimática pero limitada conectividad, mientras que otros presentan condiciones ambientales moderadas acompañadas por una intensa interacción regional. Esta diferencia evidencia que la distribución potencial del insecto depende simultáneamente de procesos ecológicos y territoriales.

Integración del Riesgo Territorial Integrado (RTI)

La principal aportación metodológica del presente estudio corresponde a la integración del Índice de Riesgo Barrenador GORRIÓN (IRB-G), el Índice de Proximidad Epidemiológica (IPE) y el Índice de Conectividad Territorial (ICT) dentro del Riesgo Territorial Integrado (RTI). La combinación de estas tres dimensiones permitió generar una representación espacial más robusta del riesgo potencial que la obtenida mediante cualquiera de los índices por separado. Mientras el IRB-G identifica territorios ambientalmente favorables, el IPE incorpora la presión epidemiológica derivada de brotes oficiales y el ICT representa la estructura funcional del territorio.

Figura 4. Corredores epidemiológicos para la Región Volcanes, Estado de México



Fuente: elaboración propia, trabajo de campo 2026.

Como resultado de esta integración se identificaron tres Corredores Epidemiológicos Potenciales (CEP) para la Región de los Volcanes: Corredor Sur, asociado a la interacción territorial con el estado de Morelos. Corredor Norte, relacionado con la conectividad hacia Chalco y el oriente del Valle de México. Corredor Metropolitano, vinculado con los procesos de interacción territorial provenientes de Milpa Alta, Xochimilco y Tlalpan.

Es importante destacar que estos corredores no representan rutas confirmadas de dispersión del gusano barrenador, sino áreas donde convergen simultáneamente condiciones ambientales favorables, proximidad epidemiológica y elevada conectividad territorial. En consecuencia, constituyen hipótesis espaciales orientadas a fortalecer la vigilancia preventiva y optimizar la asignación de recursos institucionales.

Desde el punto de vista metodológico, el RTI demuestra que la integración de múltiples dimensiones reduce las limitaciones inherentes a los modelos univariados. Mientras la favorabilidad ambiental explica el potencial ecológico para el establecimiento del insecto, la proximidad epidemiológica representa la presión ejercida por brotes recientes y la conectividad territorial incorpora la estructura funcional del paisaje. Esta arquitectura coincide con las tendencias internacionales hacia sistemas de vigilancia basados en inteligencia territorial, donde la integración de información heterogénea permite mejorar la capacidad anticipatoria frente a enfermedades emergentes^{9,10}.

En conjunto, los resultados obtenidos respaldan la hipótesis de investigación al demostrar que la integración de información agroclimática, epidemiológica y territorial proporciona una aproximación más completa para la delimitación de corredores potenciales de riesgo. La metodología desarrollada constituye una contribución novedosa para la vigilancia del gusano barrenador en México, al proponer un modelo operativo que puede actualizarse continuamente conforme se incorporen nuevos registros provenientes de la Red Agroclimática GORRIÓN, así como de otras estaciones y de los sistemas oficiales de vigilancia. Asimismo, establece las bases para la consolidación de un sistema de inteligencia territorial aplicable a otras enfermedades de importancia agropecuaria, donde la prevención depende de comprender la interacción dinámica entre ambiente, epidemiología y territorio.

DISCUSIÓN

Alcances metodológicos del RTI

El principal aporte de esta investigación consiste en proponer una arquitectura metodológica que integra información agroclimática, epidemiológica y territorial dentro de un esquema único de evaluación del riesgo. Mientras la mayor parte de los estudios disponibles sobre *Cochliomyia hominivorax* se ha centrado en modelos de distribución potencial o en la descripción espacial de brotes, el RTI incorpora tres dimensiones complementarias que representan procesos distintos del riesgo territorial. Esta integración responde a la necesidad de considerar simultáneamente las condiciones ambientales favorables, la proximidad a focos oficialmente confirmados y la conectividad funcional del territorio, evitando interpretar cualquiera de estos componentes como un predictor suficiente por sí mismo.

En este sentido, el RTI debe entenderse como una herramienta de integración de información más que como un modelo predictivo. Su finalidad es apoyar la priorización territorial de la vigilancia mediante la identificación de áreas donde convergen múltiples factores asociados con la posible circulación del insecto. Esta aproximación es consistente con la tendencia de la epidemiología espacial hacia esquemas multicriterio que combinan información ambiental y geográfica para apoyar la toma de decisiones^{9,10}.

Comparación con estudios previos

La principal contribución de este estudio consiste en proponer una arquitectura metodológica que integra información agroclimática, epidemiológica y territorial para apoyar la priorización espacial de la vigilancia del gusano barrenador del ganado. A diferencia de aproximaciones centradas exclusivamente en la distribución potencial de la especie o en la localización de brotes confirmados, el modelo RTI incorpora tres dimensiones complementarias: la favorabilidad agroclimática (IRB-G), la proximidad epidemiológica (IPE) y la conectividad territorial (ICT). Esta integración permite construir una representación territorial orientada a identificar zonas donde convergen múltiples factores asociados con el riesgo potencial, sin asumir que dicha convergencia constituye evidencia de dispersión efectiva del insecto.

Los resultados son consistentes con investigaciones previas que han señalado la importancia de las condiciones ambientales para el establecimiento de *Cochliomyia hominivorax*^{1,2}. Sin embargo, la propuesta desarrollada en este trabajo amplía esa perspectiva al considerar que la favorabilidad agroclimática representa únicamente una de las dimensiones del riesgo.

Esta interpretación coincide con estudios de distribución de especies que advierten que la idoneidad ambiental no debe equipararse con la presencia o transmisión de un organismo, debido a la influencia de procesos ecológicos, históricos y territoriales adicionales^{4,5}.

La incorporación del Índice de Proximidad Epidemiológica y del Índice de Conectividad Territorial responde a esta necesidad de ampliar la interpretación del riesgo. Mientras el IPE introduce la dimensión espacio-temporal derivada de los registros oficiales de vigilancia, el ICT incorpora elementos relacionados con la organización funcional del territorio, tales como infraestructura, movilidad pecuaria y continuidad espacial. En conjunto, estos componentes permiten explorar una aproximación integrada al riesgo territorial que resulta congruente con los planteamientos de la epidemiología espacial contemporánea, donde la distribución de las enfermedades depende de la interacción entre procesos ambientales, biológicos y territoriales^{9,10}.

Desde esta perspectiva, los Corredores Epidemiológicos Potenciales identificados en la Región de los Volcanes no deben interpretarse como rutas comprobadas de dispersión del gusano barrenador. Su utilidad radica en señalar territorios donde convergen condiciones que justifican fortalecer la vigilancia zoonosanitaria, orientar el monitoreo agroclimático y priorizar la asignación de recursos institucionales. En consecuencia, los corredores propuestos constituyen hipótesis espaciales que podrán contrastarse conforme se disponga de nuevos registros epidemiológicos y series temporales de monitoreo.

Esta interpretación resulta especialmente relevante para evitar una sobrelectura de los resultados. El modelo RTI no estima probabilidades de infestación ni sustituye los sistemas oficiales de vigilancia. Su propósito es integrar información proveniente de distintas fuentes para generar un marco de apoyo a la toma de decisiones desde una perspectiva territorial. En este sentido, el estudio debe entenderse como una propuesta metodológica susceptible de adaptación y refinamiento conforme se incorporen nuevas fuentes de información.

Implicaciones para la vigilancia

Una de las principales fortalezas del modelo consiste en utilizar información agroclimática generada por la Red GORRIÓN, lo que permite incorporar datos meteorológicos de alta resolución espacial y temporal. A diferencia de modelos basados exclusivamente en climatologías históricas o productos bioclimáticos de escala regional, esta aproximación facilita la actualización continua de la dimensión ambiental y abre la posibilidad de desarrollar sistemas de vigilancia dinámica apoyados en redes comunitarias de monitoreo.

No obstante, la investigación presenta limitaciones que deben reconocerse explícitamente. En primer lugar, las ponderaciones utilizadas para integrar el RTI responden a criterios metodológicos iniciales y requieren procesos posteriores de calibración mediante análisis de sensibilidad y validación con nuevas series de datos. En segundo lugar, el estudio se desarrolló en una región específica del centro de México, por lo que la transferencia del modelo a otros contextos deberá considerar diferencias ambientales, productivas y territoriales. Finalmente, la validación realizada corresponde a una evaluación de consistencia conceptual entre los componentes del modelo y no a una validación predictiva basada en la ocurrencia independiente de brotes. Estas limitaciones ya son reconocidas en la metodología y constituyen una agenda de investigación para etapas posteriores del desarrollo del RTI.

A partir de estos resultados, futuras investigaciones podrán incorporar información derivada de la movilización pecuaria, análisis de redes, imágenes de percepción remota y registros epidemiológicos de mayor cobertura temporal para evaluar el desempeño del modelo bajo distintos escenarios. Asimismo, será pertinente comparar la capacidad del RTI con otros enfoques de evaluación del riesgo y desarrollar procedimientos de validación externa que permitan estimar su utilidad operativa en diferentes regiones del país.

En conjunto, los hallazgos obtenidos sugieren que la integración de información agroclimática, epidemiológica y territorial constituye una vía prometedora para fortalecer la vigilancia preventiva del gusano barrenador desde una perspectiva de inteligencia territorial. Más que ofrecer un modelo predictivo concluido, el RTI proporciona una base metodológica para organizar información heterogénea, formular hipótesis espaciales y orientar futuras estrategias de monitoreo y evaluación del riesgo.

Limitaciones del estudio

Los resultados deben interpretarse considerando varias limitaciones. En primer lugar, las ponderaciones empleadas para integrar el RTI corresponden a una propuesta metodológica inicial y requieren procesos posteriores de calibración mediante análisis de sensibilidad.

En segundo lugar, la evaluación se realizó utilizando información correspondiente a una región específica del centro de México, por lo que su aplicación en otros territorios demandará ajustes derivados de sus condiciones ambientales, epidemiológicas y productivas. Finalmente, la validación desarrollada fue de carácter conceptual y metodológico; por tanto, la utilidad predictiva del modelo deberá evaluarse mediante series temporales más extensas, nuevos registros epidemiológicos y ejercicios independientes de validación externa.

CONCLUSIONES

La presente investigación desarrolló una arquitectura metodológica de inteligencia territorial para integrar información agroclimática, epidemiológica y territorial con el propósito de apoyar la delimitación de corredores epidemiológicos potenciales del gusano barrenador del ganado (*Cochliomyia hominivorax*) en el centro de México. El principal aporte del estudio consiste en mostrar la viabilidad metodológica de integrar estas tres dimensiones dentro de un esquema multicriterio que amplía la evaluación territorial del riesgo más allá de los enfoques sustentados exclusivamente en variables ambientales o en registros epidemiológicos aislados.

La propuesta distingue explícitamente entre favorabilidad agroclimática y riesgo epidemiológico, reconociendo que la existencia de condiciones ambientales favorables no constituye evidencia de infestación o dispersión del insecto. A partir de esta diferenciación conceptual, el Riesgo Territorial Integrado (RTI) incorpora la proximidad a brotes oficialmente confirmados y la conectividad funcional del territorio para construir una representación espacial más integral del riesgo. En consecuencia, el RTI debe entenderse como una arquitectura metodológica para la integración de información, y no como un modelo predictivo plenamente validado.

Los Corredores Epidemiológicos Potenciales (CEP) identificados mediante esta metodología representan hipótesis espaciales derivadas de la convergencia entre favorabilidad agroclimática, presión epidemiológica y conectividad territorial. Por ello, su utilidad radica en orientar la priorización territorial de acciones de vigilancia, monitoreo y prevención, sin asumir que constituyen rutas confirmadas de dispersión del gusano barrenador del ganado.

Desde una perspectiva aplicada, la investigación pone de manifiesto el potencial de integrar la información generada por los sistemas oficiales de vigilancia zoonosanitaria con redes comunitarias de monitoreo agroclimático, como el Proyecto GORRIÓN. Esta articulación puede fortalecer los sistemas de alerta temprana, mejorar la focalización territorial de las acciones preventivas y contribuir a una asignación más eficiente de los recursos destinados a la vigilancia sanitaria, especialmente en regiones caracterizadas por una elevada heterogeneidad ambiental y productiva.

No obstante, los resultados deben interpretarse considerando las limitaciones del estudio. La integración multicriterio propuesta requiere procesos posteriores de calibración y validación externa mediante series temporales más extensas, nuevos registros epidemiológicos y análisis de sensibilidad que permitan evaluar la robustez del modelo bajo diferentes escenarios. Asimismo, futuras investigaciones deberán incorporar información relacionada con la movilidad pecuaria, redes comerciales, percepción remota, sensores ambientales y técnicas de aprendizaje automático para fortalecer el desempeño operativo del RTI y ampliar su capacidad de transferencia a otros contextos territoriales.

En conjunto, esta investigación establece una base metodológica para el desarrollo de sistemas de inteligencia territorial aplicados a la vigilancia zoonosanitaria. Aunque el estudio se centró en *Cochliomyia hominivorax*, la arquitectura propuesta posee un carácter potencialmente transferible hacia otros problemas sanitarios cuya dinámica depende de la interacción entre procesos ambientales, epidemiológicos y territoriales.

Más que proponer un nuevo índice de riesgo, este trabajo plantea una arquitectura metodológica para integrar múltiples fuentes de información dentro de un marco de inteligencia territorial, proporcionando una base conceptual y operativa para el desarrollo de sistemas de vigilancia preventiva capaces de apoyar la toma de decisiones en sanidad animal bajo escenarios de creciente complejidad ambiental y territorial.

Referencias

1. Hall MJR, Wall R. Myiasis of humans and domestic animals. *Adv Parasitol.* 1995;35:257-334.
2. Moo-Llanes DA, Danis-Lozano R, Rivero-Pérez NE, Trejo-Acevedo A, Espinal-Palomino R, Rodríguez-Luna CR, et al. Biological reinvasion of *Cochliomyia hominivorax* (Diptera: Calliphoridae) in Mexico: impacts and risks under different climate change scenarios. *J Econ Entomol.* 2026;toag204. <https://doi.org/10.1093/jee/toag204>
3. Wyss JH. Screwworm eradication in the Americas. *Ann N Y Acad Sci.* 2000;916(1):186-193. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2000.tb05289.x>
4. Elith J, Leathwick JR. Species distribution models: ecological explanation and prediction across space and time. *Annu Rev Ecol Evol Syst.* 2009;40:677-697. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.110308.120159>
5. Franklin J. Mapping species distributions: spatial inference and prediction. Cambridge: Cambridge University Press; 2010.
6. Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria. Estrategia de vigilancia epidemiológica por trampeo de la mosca *Cochliomyia hominivorax* en México [Internet]. México: Gobierno de México; 2026 [citado 24 jul 2026]. <https://www.gob.mx/senasica/documentos/estrategia-de-vigilancia-epidemiologica-por-trampeo-de-la-mosca-cochliomyia-hominivorax-en-mexico?state=published>
7. Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria. Tablero nacional de vigilancia epidemiológica del gusano barrenador del ganado [Internet]. México: Gobierno de México; 2026 [citado 24 jul 2026]. https://dj.senasica.gob.mx/Contenido/tableros/informe_semanal_gbg/index.html
8. World Organisation for Animal Health. New World screwworm *Cochliomyia hominivorax* [Internet]. Paris: WOA; 2026 [citado 24 jul 2026]. <https://wahis.woah.org/#/in-review/7530?reportId=183831&fromPage=event-dash-board-url>
9. Pfeiffer DU, Robinson TP, Stevenson M, Stevens KB, Rogers DJ, Clements ACA. Spatial analysis in epidemiology. Oxford: Oxford University Press; 2008.
10. Eisen L, Eisen RJ. The One Health approach to vector-borne diseases. *Annu Rev Entomol.* 2023;68:21-40. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-120220-013709>
11. Sánchez Jiménez E. Modelo predictivo ecoepidemiológico del gusano barrenador del ganado *Cochliomyia hominivorax* basado en redes agroclimáticas en el Estado de México. *Rev Ecuat Desarro Soc Ambient.* 2026;1(2):85-102. <https://doi.org/10.66646/0d7egw40>
12. Malczewski J. GIS and multicriteria decision analysis. New York: John Wiley & Sons; 1999.
13. Ostfeld RS, Glass GE, Keesing F. Spatial epidemiology: an emerging or re-emerging discipline? *Trends Ecol Evol.* 2005;20(6):328-336. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.03.009>
14. Hall MJR, Wall R, Stevens JR. Traumatic myiasis: a neglected disease in a changing world. *Annu Rev Entomol.* 2016;61:159-176. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-010715-023655>
15. Sánchez Jiménez E. Arquitectura metodológica del Riesgo Territorial Integrado: integración agroclimática, epidemiológica y territorial para la vigilancia preventiva. Atlautla: Universidad Politécnica de Atlautla; 2026. Manuscrito en preparación.
16. Welch JB. *Cochliomyia hominivorax* New World screwworm. En: CABI Compendium [Internet]. Wallingford: CABI; 2016 [citado 24 jul 2026]. <https://doi.org/10.1079/cabicompendium.11753>
17. World Organisation for Animal Health. Self-declaration of Mexico as free from myiasis caused by *Cochliomyia hominivorax* [Internet]. Paris: WOA; 2019 [citado 24 jul 2026]. <https://www.woah.org/app/uploads/2021/03/2019-07-mexico-miasis-eng.pdf>
18. World Organisation for Animal Health. World Animal Health Information System WAHIS [Internet]. Paris: WOA; 2026 [citado 24 jul 2026]. <https://wahis.woah.org>

Financiación

No aplica.

Conflictos de interés

No existe.

Contribución de autoría

Conceptualización: Eduardo Sánchez Jiménez.

Curación de datos: Eduardo Sánchez Jiménez.

Análisis formal: Eduardo Sánchez Jiménez.

Investigación: Eduardo Sánchez Jiménez.

Metodología: Eduardo Sánchez Jiménez.

Supervisión: Eduardo Sánchez Jiménez.

Validación: Eduardo Sánchez Jiménez.

Visualización: Eduardo Sánchez Jiménez.

Redacción – borrador original: Eduardo Sánchez Jiménez.

Redacción – revisión y edición: Eduardo Sánchez Jiménez.