



Universidad Internacional de La Rioja

Facultad de Ciencias de la Salud

Máster Universitario en Epidemiología y Salud Poblacional

Impacto del cambio climático en la
dinámica de zoonosis en Colombia: un
modelo de sistemas en Vensim® bajo el
enfoque *One Health*

Trabajo fin de estudio presentado por:	Adriana Estrada Estrada Deicy Erminia Bautista Ríos José Isaías Muñoz Pineda
Tipo de trabajo:	Tipo 4 – Investigación
Director/a:	Dra. Elena Salamanca Fernández
Fecha:	Febrero 10 de 2026

Resumen

El modelo SEIVD desarrollado en Vensim® constituye una herramienta dinámica para analizar la transmisión de la rabia canina en Colombia bajo el enfoque de *One Health*, integrando dimensiones epidemiológicas, ambientales y demográficas. Su estructura incorpora los procesos clave del ciclo infeccioso en perros —susceptibilidad, exposición, infección clínica, vacunación y mortalidad— permitiendo simular la progresión temporal de la enfermedad y evaluar el impacto de distintos determinantes sobre la fuerza de infección. El submodelo ambiental introduce la temperatura media y la supervivencia viral como moduladores indirectos del riesgo, posibilitando explorar escenarios de climas fríos, templados y cálidos en un contexto de cambio climático. El submodelo animal captura la dinámica de transmisión perro-perro y permite cuantificar incidencia, casos acumulados y sensibilidad frente a variaciones en la cobertura vacunal y la estabilidad viral.

De manera complementaria, el submodelo humano actúa como un componente centinela que traduce los cambios en la transmisión animal en riesgo poblacional, integrando la exposición por mordedura, la profilaxis posexposición y la letalidad del 100 % sin tratamiento. La integración de estos tres módulos permite identificar territorios vulnerables, umbrales epidemiológicos críticos y factores ambientales que amplifican o reducen la transmisión. Los resultados ofrecen una base sólida para orientar estrategias de vigilancia, campañas de vacunación canina superiores al 80 %, fortalecimiento territorial y articulación entre salud pública, salud ambiental y salud animal, aportando un insumo estratégico para la toma de decisiones. **En este sentido, el modelo se enmarca como un estudio exploratorio basado en simulación mediante dinámica de sistemas.**

Palabras clave: Cambio Climático, Zoonosis, Sistemas Dinámicos, Vensim.

Abstract

The SEIVD model developed in Vensim® constitutes a dynamic tool for analyzing the transmission of canine rabies in Colombia within a One Health framework, integrating epidemiological, environmental, and demographic dimensions. Its structure incorporates the key processes of the infectious cycle in dogs—susceptibility, exposure, clinical infection, vaccination, and mortality—allowing the simulation of temporal disease progression and the assessment of how various determinants influence the force of infection. The environmental submodel introduces mean temperature and viral survival as indirect modulators of risk, enabling the exploration of cold, temperate, and warm climatic scenarios within the context of climate change. The animal submodel captures dog-to-dog transmission dynamics and allows estimation of incidence, cumulative cases, and system sensitivity to variations in vaccination coverage and viral stability.

Complementarily, the human submodel acts as a sentinel component that translates changes in animal transmission into population-level risk, integrating exposure through bites, post-exposure prophylaxis, and the 100% case fatality rate in the absence of treatment. The integration of these three modules allows the identification of vulnerable territories, critical epidemiological thresholds, and environmental factors that amplify or reduce transmission. The results provide a robust basis to guide surveillance strategies, canine vaccination campaigns exceeding 80% coverage, territorial strengthening, and coordination among public health, environmental health, and animal health, thereby offering a strategic input for decision-making. **In this sense, the model is framed as an exploratory study based on system dynamics simulation.**

Keywords: Climate Change, Zoonoses, Dynamic Systems, Vensim.

Índice de contenidos

Tabla de contenido

Organización del trabajo en grupo.	10
Mecanismo de acción	11
1. Introducción	13
1.1. Contexto del Cambio Climático en Colombia y América Latina	13
1.2. Aumento de riesgos zoonóticos en Colombia (emergentes y reemergentes).	15
1.3. Integración del enfoque <i>One Health</i>	17
1.4. Contexto de modelos dinámicos para anticipar escenarios.....	19
1.4.1. Modelos dinámicos y epidemiología matemática	19
1.5. Vensim como Herramienta para Simular Escenarios Epidemiológicos con el Modelo SEIRS y Enfoque <i>One Health</i>	22
2. Justificación	25
3. Objetivos	26
3.1 Objetivo general.....	26
3.2. Objetivos específicos	27
4. Materiales y Métodos.....	28
4.1. Relación entre los modelos SEIRS y SEIVD: un marco compartido con aplicaciones diferenciadas.....	28
4.1.1. Modelo SEIRS: Infecciones con inmunidad temporal.	28
4.1.2. Modelo SEIVD: Alta letalidad y control con vacunación.	28
4.1.3. Conexión entre SEIRS y SEIVD: una misma base estructural.	29

4.2. Pasos Metodológicos con Enfoque <i>One Health</i> para el Desarrollo de Modelos SEIRS - SEIVD	30
4.2.1. Definición del problema y objetivos del modelo.	32
4.2.2. Recolección y estructuración de datos multidimensionales.	32
4.2.3. Diseño conceptual del modelo SEIRS - SEIVD	34
4.2.4. Implementación en Vensim.	36
4.2.5. Calibración y validación del modelo.	43
4.2.6. Simulación de escenarios y análisis de sensibilidad.....	43
4.2.7. Interpretación de resultados y formulación de recomendaciones.	44
4.2.8. Comunicación y transferencia del modelo a tomadores de decisión.....	44
5. Evaluación propuesta del Modelo SEIVD según dinámica de rabia canina en Colombia	45
5.1. Coherencia de los parámetros epidemiológicos y ambientales utilizados	45
5.2. Escenarios de temperatura y riesgo zoonótico en rabia canina.....	46
5.2.1. Justificación de los rangos térmicos utilizados	47
5.2.2. Escenario frío (baja temperatura → alta supervivencia viral)	48
5.2.3. Escenario templado (temperatura intermedia → supervivencia moderada)	48
5.2.4. Escenario cálido (alta temperatura → baja supervivencia viral)	49
5.2.5. Escenarios epidemiológicos y climáticos simulados	49
5.3. Discusión sobre el sesgo territorial	51
5.4. Desarrollo del objetivo general aplicando sistemas dinámicos.....	51
6. Discusión	54
6.1. Interpretación integral del modelo SEIVD y su aporte metodológico.....	54
6.2. Coherencia con la evidencia científica previa.....	55

6.3. Formulación de recomendaciones bajo enfoque One Health	56
7. Conclusiones	58
7.1. Principales hallazgos y contribuciones	58
7.2. Relevancia del modelo para la gestión de zoonosis	59
7.3. Integración con estrategias <i>One Health</i>	60
7.4. Escalabilidad y aplicabilidad.....	61
7.5. Valor agregado para la salud pública colombiana	61
8. Limitaciones y Prospectiva	62
8.1. Limitaciones del estudio	62
8.1.1. Limitaciones de datos.....	62
8.1.2. Limitaciones metodológicas.....	62
8.1.3. Limitaciones de alcance	62
8.2. Retos en la validación y transferencia institucional	63
9. Referencias Bibliográficas	64
10. Anexos	71
Anexo A. Situación epidemiológica de la rabia canina y humana en Colombia	71
Anexo B. Consideraciones éticas y de gobernanza de datos.....	77
Anexo C. Guía para la Organización y Análisis de Variables bajo <i>One Health</i>	78
Anexo D. Capturas de pantalla correspondientes a la diagramación, calibración, validación y funcionamiento del modelo general e integral de SEIVD rabia.....	83
Anexo E. Diagramas y parámetros epidemiológicos y ambientales utilizados para las simulaciones de los diferentes escenarios	86
Anexo F. Acta reunión espacio de trabajo Ministerio de Salud y Protección Social.	91

Adriana Estrada
Deicy Erminia Bautista Ríos
José Isaías Muñoz Pineda
Impacto del cambio climático en la dinámica de zoonosis en Colombia:
un modelo de sistemas en Vensim bajo el enfoque One Health

Índice de Figuras

Figura 1. <i>Dinámica del modelo epidemiológico SEIRS.</i>	19
Figura 2. <i>SEIRS: Un Modelo Predictivo para la Salud Humana, Animal y Ambiental.</i>	21
Figura 3. <i>Vensim (Ventana Simulation) como Sistema Dinámico.</i>	24
Figura 4. <i>Desarrollo de Modelos SEIRS – SEIVD con Enfoque One Health.</i>	30
Figura 5. <i>Pasos Metodológicos para el Desarrollo de Modelos SEIRS- SEIVD con Enfoque One Health.</i>	31
Figura 6. <i>Captura de pantalla submodelo animal SEIVD rabia ciclo urbano</i>	35
Figura 7. <i>Captura de pantalla dinámica SEIVD de la población canina durante 360 días</i>	35
Figura 8. <i>Captura de pantalla Modelo SEIVD rabia bajo el enfoque de One Health</i>	41
Figura 9. <i>Comportamiento de la rabia en perro, gato, zorro, murciélago. Colombia. Periodo 1973 a 2024</i>	73
Figura 10. <i>Comportamiento de la rabia en herbívoros en Colombia en el periodo 2005-2024.</i>	73
Figura 11. <i>Captura de pantalla sobre búsqueda referencias bibliográficas en PubMed</i>	82
Figura 12. <i>Submodelo animal del SEIVD para rabia canina</i>	86
Figura 13. <i>Submodelo ambiental del SEIVD para rabia canina</i>	88

Índice de tablas

Tabla 1. <i>Comparación de los modelos epidemiológicos SEIRS y SEIVD en contextos zoonóticos.</i>	29
Tabla 2. <i>Parámetros del modelo SEIVD para rabia canina en Colombia</i>	37
Tabla 3. <i>Información general para las diferentes simulaciones</i>	42
Tabla 4. <i>Comparación estructural y epidemiológica entre el submodelo animal y el submodelo humano en el sistema SEIVD de rabia</i>	42
Tabla 5. <i>Estructura y resultados de los diferentes escenarios simulados</i>	43
Tabla 6. <i>Casos de Rabia humana en Colombia periodo 1999 – 2024.</i>	71
Tabla 7. <i>Población estimada de perros y gatos por Entidades Territoriales en Colombia 2025</i>	74
Tabla 8. <i>Consideraciones éticas y de gobernanza de datos en el modelado epidemiológico</i>	77
Tabla 9. <i>Matriz ecuación de búsqueda de reseñas bibliográficas.</i>	80
Tabla 10. <i>Palabras clave sugeridas (en inglés y español)</i>	81
Tabla 11. <i>Parámetros del submodelo animal del SEIVD para rabia canina</i>	87
Tabla 12. <i>Parámetros del submodelo ambiental del SEIVD para rabia canina</i>	88
Tabla 13. <i>Parámetros del submodelo humano del SEIVD para rabia canina</i>	89

Organización del trabajo en grupo.

Mes	Objetivo(s) asociado(s)	Actividades clave	Adriana (IVensim)	José Jesús (epidemiología)	Deicy Erminia (factores ambientales y apoyo epidemiológico)	Entregables
Mes 1	OE1. Identificar y parametrizar factores climáticos, ecológicos y sociales.	-Revisión bibliográfica sobre zoonosis y cambio climático. - Identificación de factores climáticos (temperatura, lluvia, uso de suelo). - Diseño conceptual del modelo SEIR adaptado (stocks y flujos).	- Elaborar el bosquejo del modelo conceptual en Vensim. - Definir estructura preliminar de stocks y flujos.	-Revisar bibliografía sobre zoonosis en Colombia. - Identificar variables epidemiológicas clave (periodos de incubación, transmisibilidad).	- Revisar literatura de factores climáticos y ecológicos. - Sistematizar información sobre reservorios y vectores.	- Matriz bibliográfica (Vancouver). - Tabla de factores climáticos y zoonóticos. - Diagrama conceptual inicial del modelo.
Mes 2	OE2. Recolectar y organizar datos históricos. OE3. Construir modelo SEIR ampliado en Vensim.	- Implementación técnica del modelo en Vensim (SEIR + clima + reservorios). - Definición de parámetros claves para el modelo entre otros. - Redacción del marco metodológico (modelo y justificación).	- Construcción del modelo SEIR adaptado en Vensim. - Programar variables climáticas y zoonóticas dentro del software. - Redactar justificación metodológica del modelado.	-Aportar parámetros epidemiológicos (periodos, transmisibilidad, tasas de recuperación).	- Aportar factores ambientales y datos de reservorios. - Validar coherencia de parámetros climáticos.	-Archivo modelo Vensim (.mdl). - Tabla de parámetros con fuentes. - Redacción inicial de metodología.
Mes 3	OE3. Construcción y proyección de escenarios. OE4. Evaluar sensibilidad del modelo.	-Simulación de escenarios climáticos (optimista, moderado, crítico). - Análisis de sensibilidad de parámetros. - Redacción de resultados parciales.	-Ejecutar simulaciones y análisis de sensibilidad en Vensim. - Exportar gráficos de escenarios y dinámicas de transmisión.	-Interpretar resultados desde la epidemiología. - Relacionar resultados con patrones de zoonosis en Colombia.	-Analizar implicaciones de los resultados en factores ambientales. - Redactar discusión preliminar junto con José.	- Gráficos de escenarios y sensibilidad. - Tablas comparativas de resultados. - Redacción preliminar de resultados.
Mes 4	OE4. Escenarios de intervención. OE5. Recomendaciones One Health.	-Modelar intervenciones de salud pública (vacunación animal, control vectorial, mitigación ambiental). - Redacción de discusión, conclusiones, limitaciones y	- Diseñar y ejecutar escenarios de intervención en Vensim. - Exportar resultados finales. - Liderar la integración técnica de todo el trabajo en el documento.	- Redactar la discusión epidemiológica. - Formular recomendaciones One Health.	-Redactar conclusiones, limitaciones y prospectiva. - Apoyar en la integración del documento final.	- Gráficos y tablas de intervenciones. - Documento final TFM. - Resumen ejecutivo con recomendaciones para política pública.

Impacto del cambio climático en la dinámica de zoonosis en Colombia:
un modelo de sistemas en Vensim bajo el enfoque One Health

Mes	Objetivo(s) asociado(s)	Actividades clave	Adriana (IVensim)	José Jesús (epidemiología)	Deicy Erminia (factores ambientales y apoyo epidemiológico)	Entregables
		prospectiva. Integración del documento final.				

Mecanismo de acción

Reunión	Gestión Documental	Roles de Articulación	Seguimiento / Control	Criterios de Integración
17 sept 2025 - Presentación y orientación inicial	Presentación del cronograma TFM	Adriana: integra modelos José: valida parámetros Deicy: enlaza factores ambientales	Compromiso de envío del cronograma a la directora (18 sept)	Bibliografía en Zotero/Mendeley Versionado de modelos Vensim Documento compartido
20 sept 2025 - Investigación del trabajo TFM	Identificación y parametrización de factores y bosquejo conceptual	Adriana / José / Deicy	Cada integrante investiga según su rol	Investigación alineada al perfil asignado
27 sept 2025 - Desarrollo del TFM	Organización del desarrollo según roles	Adriana / José / Deicy	Entrega del avance según funciones	Entrega de información completa
04 oct 2025 - Aportes de bibliografía	Desarrollo del TFM según cronograma	Adriana / José / Deicy	Revisión de información para el TFM	Búsqueda y uso de citas bibliográficas
11 oct 2025 – Retroalimentación	Desarrollo del TFM según cronograma	Adriana / José / Deicy	Cumplimiento de compromisos	Entrega según responsabilidades
18 oct 2025 - Organización en Mendeley	Desarrollo del TFM según cronograma	Adriana / José / Deicy	Revisión y ajuste de citas en Mendeley	Organización de bibliografía
25 oct 2025 - Avances para primer informe	Desarrollo del TFM según cronograma	Adriana / José / Deicy	Ajustes según retroalimentación	Ajustes de bibliografía en Mendeley
01 nov 2025 - Presentación y ajustes	Desarrollo del TFM según cronograma	Adriana / José / Deicy	Organización para entrega del 3 nov	Entrega del documento: Intro, Justificación, Objetivos, Métodos
08 nov 2025 - Retroalimentación directora	Desarrollo del TFM según cronograma	Adriana / José / Deicy	Ajustes del trabajo TFM	Continuar con correcciones
15 nov 2025 - Avances individuales	Desarrollo del TFM según cronograma	Adriana / José / Deicy	Exposición de avances	Aplicación de observaciones
22 nov 2025 - Ajustes para segunda entrega	Desarrollo del TFM según cronograma	Adriana / José / Deicy	Revisión de bibliografía	Ajustes según observaciones
29 nov 2025 - Organización final	Desarrollo del TFM según cronograma	Adriana / José / Deicy	Preparación de la segunda entrega (3 dic)	TFM ajustado con observaciones finales

Impacto del cambio climático en la dinámica de zoonosis en Colombia:
un modelo de sistemas en Vensim bajo el enfoque One Health

03 dic 2025 – Segunda entrega TFM	Desarrollo del TFM según cronograma	Adriana / José / Deicy	Entrega segundo avance	Entrega del documento TFM
15 dic 2025 – Reunión nueva directora	Desarrollo del TFM según cronograma	Adriana / José / Deicy	Retroalimentación del trabajo TFM	Trabajo en equipo según observaciones
17 dic 2025 – Asistencia grupo TFM	Desarrollo del TFM según cronograma	Adriana / José / Deicy	Ejecución modelo Vensim, análisis epidemiológico y ambiental	Discusión y conclusiones
19 dic 2025 – Entrega extraordinaria	Desarrollo del TFM según cronograma	Adriana / José / Deicy	Entrega extraordinaria según compromisos	Entrega del documento TFM a la directora
27 dic 2025 – Ajustes finales	Desarrollo del TFM según cronograma	Adriana / José / Deicy	Ajustes según observaciones	Trabajo colaborativo por funciones
31 dic 2025 – Documento final	Desarrollo del TFM según cronograma	Adriana / José / Deicy	Documento estructurado con observaciones	Documento para revisión final

1. Introducción

1.1. Contexto del Cambio Climático en Colombia y América Latina

El cambio climático constituye una de las amenazas ambientales y sanitarias más relevantes del siglo XXI. Sus efectos ya se observan sobre los patrones de temperatura, precipitación y frecuencia de eventos extremos en todo el mundo. En Colombia, las transformaciones ambientales derivadas de la deforestación, la fragmentación de hábitats y los cambios en el uso del suelo han modificado de manera significativa la estructura y funcionamiento de diversos ecosistemas, incrementando la exposición de las poblaciones humanas a zoonosis priorizadas.

En este contexto, el término “zoonosis priorizadas” se refiere a aquellas enfermedades zoonóticas definidas como de interés prioritario para la salud pública en Colombia por el Ministerio de Salud y Protección Social y el Instituto Nacional de Salud, en concordancia con los lineamientos del Sistema Nacional de Vigilancia en Salud Pública (SIVIGILA). Dicha priorización se fundamenta en criterios como la carga de enfermedad, la letalidad, el potencial de transmisión y expansión epidémica, el impacto socioeconómico, y la factibilidad de prevención, vigilancia y control, en armonía con los enfoques regionales de la OPS y el marco global *One Health* promovido por la OMS.

Los ecosistemas de mayor relevancia en este proceso incluyen las selvas tropicales amazónicas, los bosques montanos andinos y las zonas de transición entre áreas naturales y sistemas agrícolas o ganaderos. En estos entornos, la pérdida de biodiversidad, la alteración de microclimas y el aumento de interfaces entre fauna silvestre, animales domésticos y comunidades humanas facilitan la circulación y transmisión de agentes zoonóticos. Estas dinámicas ambientales favorecen la emergencia y reemergencia de enfermedades vectoriales, hídricas y aquellas asociadas a reservorios silvestres, lo que subraya la necesidad de integrar la conservación y gestión ecosistémica en las estrategias de prevención y control de riesgos en salud pública.

A escala regional, los informes científicos señalan que América Latina, incluida Colombia, es particularmente sensible a impactos climáticos. Esta vulnerabilidad se debe a su gran diversidad ecológica, heterogeneidad altitudinal y dependencia de recursos naturales, lo que exige estrategias de adaptación y vigilancia ajustada a la variabilidad local (1). La **modelización epidemiológica** se articula directamente con estas estrategias al permitir **integrar variables ambientales, climáticas y sociales**, simular escenarios locales de riesgo y evaluar el impacto potencial de distintas intervenciones. En particular, los modelos dinámicos y espaciales facilitan la **identificación de zonas y periodos críticos**, optimizan la asignación de recursos y apoyan la **toma de decisiones adaptativa**, haciendo posible una vigilancia más precisa y sensible a la variabilidad local.

La interacción entre cambio climático y factores antropogénicos (como la deforestación, la expansión agrícola, la urbanización no planificada y los cambios en el uso del suelo) modifica los hábitats de vectores y reservorios. Ejemplo concreto con la zoonosis: Rabia silvestre en Colombia.

La rabia en Colombia tiene dos ciclos principales:

1. Urbano (perros y gatos).
2. Silvestre, donde el principal reservorio es el murciélago hematófago *Desmodus rotundus* (vampiro común).

Los murciélagos hematófagos no son “vectores” en sentido estricto, sino reservorios y transmisores directos. Por tanto, el impacto ambiental afecta sobre todo su ecología y la probabilidad de contacto con humanos y ganado.

Esto aumenta las oportunidades de contacto entre humanos y animales, y altera los periodos de estacionalidad de la transmisión, favoreciendo así la aparición y reemergencia de zoonosis, es decir, enfermedades transmitidas entre animales y humanos (2).

En Colombia, las variaciones climáticas documentadas y las proyecciones nacionales muestran cambios en temperatura media, alteraciones del régimen de lluvias y un aumento en la

ocurrencia de eventos extremos. Todo esto tiene implicaciones directas para la salud pública y la dinámica de enfermedades transmitidas por vectores y reservorios animales. El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y otros organismos técnicos han generado escenarios climáticos a mediano y largo plazo que permiten identificar territorios y periodos de mayor riesgo, insumos imprescindibles para diseñar sistemas de vigilancia y respuesta integrada (3).

1.2. Aumento de riesgos zoonóticos en Colombia (emergentes y reemergentes).

El riesgo de zoonosis emergentes y reemergentes aumenta cuando condiciones ecológicas y sociales favorecen el “*spillover*” (salto de patógenos desde reservorios animales hacia poblaciones humanas) o cuando vectores amplían su rango de distribución. Estos procesos dependen de umbrales ecológicos (temperatura, humedad) y de factores humanos (movilidad, urbanización, prácticas productivas). En países megadiversos como Colombia, la combinación de alta riqueza de hospedadores potenciales y cambios en el paisaje incrementa la probabilidad de detección de nuevos patógenos o de reaparición de enfermedades previamente controladas (4).

Los estudios nacionales e internacionales coinciden en que variables climáticas — temperatura, precipitación, humedad relativa y eventos extremos asociados a los fenómenos El Niño/La Niña— tienen correlación con la dinámica de arbovirosis y otras zoonosis. Por lo tanto, la integración de señales climáticas a los sistemas de vigilancia de salud pública puede mejorar la capacidad de predicción y focalización de intervenciones (2).

En Colombia, múltiples factores confluyen para aumentar el riesgo zoonótico. El cambio climático ha modificado los patrones de temperatura, humedad y precipitación, favoreciendo la adaptación y expansión geográfica de vectores y reservorios de patógenos(1–4). La deforestación, la urbanización no planificada, la intensificación agrícola y la movilidad poblacional contribuyen adicionalmente a crear entornos donde los límites entre ecosistemas naturales y comunidades humanas se vuelven difusos, incrementando las oportunidades de transmisión (3,4).

Bajo ese contexto, la epidemiología en Colombia y América Latina en la actualidad enfrenta desafíos sin precedentes, producto de la relación entre el cambio climático, la transformación de los ecosistemas y el incremento de enfermedades zoonóticas emergentes y reemergentes. Colombia, ubicado en una zona tropical con alta biodiversidad, representa un contexto particularmente vulnerable donde la salud humana, animal y ambiental se encuentran intrínsecamente interconectadas (5). La estrecha interacción entre humanos y animales, sumada al aumento de la actividad comercial y la movilización de personas y productos, ha propiciado una mayor diseminación de las zoonosis, enfermedades que no solo impactan la salud pública, sino que también generan severas pérdidas económicas en la región. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), aproximadamente el 60% de todas las enfermedades infecciosas humanas tienen origen zoonótico y alrededor del 75% de las enfermedades emergentes se transmiten entre especies (6).

En ese sentido, el enfoque *One Health* (Una Sola Salud) emerge como una estrategia integral fundamental para abordar esta complejidad, promoviendo la articulación de la salud humana, animal y ambiental con el objetivo de optimizar los esfuerzos de prevención, vigilancia y respuesta ante enfermedades zoonóticas (7,8). Este paradigma reconoce las interconexiones entre ecosistemas y salud, proponiendo metodologías colaborativas interdisciplinarias para enfrentar los desafíos sanitarios contemporáneos amplificados por el cambio climático(9). En el contexto de eventos naturales extremos y los desastres, la vigilancia de posibles brotes zoonóticos es fundamental, ya que estos pueden surgir por la contaminación del agua, producto de deslizamientos, avalanchas o inundaciones, y adicionalmente, por el desplazamiento de animales.

Sin embargo, a pesar de los avances en vigilancia epidemiológica en Colombia, persisten brechas significativas en la integración sistemática de datos climáticos y ecológicos en los sistemas de monitoreo de enfermedades zoonóticas (10). El análisis del Banco Mundial en su informe (2024) reveló que, entre 2010-2019, las variaciones de temperatura cobraron 9.473 vidas en Colombia. Se proyecta que para 2050 la mortalidad relacionada con el calor superará al frío como principal causa de muerte por temperaturas (11). El costo del cambio climático

en la salud alcanzó los USD 1,8 mil millones en 2020, constituyendo el 0,7% del Producto Interno Bruto (PIB), con proyecciones de aumento a USD 7,8 mil millones en 2050 (11).

Las limitaciones del enfoque de riesgo tradicional en la comprensión e intervención de las zoonosis han sido señaladas por diversos autores. Argumentan que la epidemiología clásica resulta insuficiente para abordar el carácter complejo y socialmente determinado de la relación entre naturaleza y salud (12). La necesidad de incrementar la vigilancia en salud, mejorar los sistemas de predicción y desarrollar sistemas de monitoreo que incorporen datos en tiempo real sobre cambio climático y salud pública constituye una prioridad para fortalecer la respuesta sanitaria del país (10,11), principalmente ante eventos zoonóticos priorizados.

Entre las zoonosis más relevantes en Colombia se encuentran la brucelosis bovina y caprina, la leptospirosis, la rabia urbana y silvestre, la tuberculosis bovina, la toxoplasmosis, la influenza aviar y la encefalitis equina. Estas enfermedades afectan tanto la salud animal como la humana, generando pérdidas económicas por disminución de la productividad, restricciones comerciales y gastos en salud pública y control sanitario. Por ejemplo, la brucelosis bovina continúa siendo un problema endémico en varias regiones del país y representa un riesgo ocupacional importante para trabajadores del sector agropecuario y pecuario y, en el caso de la rabia, persiste la presentación de rabia de origen canino, mientras que el virus transmitido por animales silvestres (principalmente quirópteros) ha aumentado en los últimos años en zonas de frontera agrícola y selvática, lo que refleja cambios en la dinámica ecológica de los reservorios (2–4).

1.3. Integración del enfoque *One Health*

El enfoque *One Health* promueve respuestas intersectoriales que integran la salud humana, animal y ambiental para prevenir, detectar y controlar riesgos complejos. La formulación y uso de modelos dinámicos que incorporen variables climáticas, ecológicas y socioeconómicas constituye un aporte científico al generar evidencia cuantitativa sobre mecanismos causales y escenarios prospectivos; además, tiene un claro valor social porque orienta la planificación de recursos, la focalización de intervenciones y el diseño de políticas públicas adaptativas en contextos vulnerables. La *One Health Joint Plan of Action* (2022–2026) subraya la necesidad

de herramientas integradas y de cooperación institucional para reducir riesgos zoonóticos y fortalecer la resiliencia sanitaria (13).

La inclusión de esta perspectiva en los modelos permite analizar de manera simultánea, articulada y complementaria, factores climáticos (sequías, inundaciones), sociales (migración, pobreza, cambios en uso del suelo) y sanitarios (densidad de reservorios, acceso a servicios de salud), mejorando la comprensión, y por ende la gestión intersectorial de los determinantes sistémicos de las zoonosis (14).

El desarrollo de *One Health* en modelación se traduce en acoplar módulo humano–animal–ambiente con flujos de datos intersectoriales de tipo sanitario, zoonosanitario y ambiental y niveles de gobernanza (local–nacional). Esto habilita tableros de alerta temprana con indicadores compuestos (entomología + clima + movilidad + vigilancia clínica) y líneas de actuación coordinadas (control vectorial, bioseguridad, comunicación de riesgos (14–16).

Asimismo, la integración del SEIVD dentro del marco *One Health* facilita la simulación de efectos diferenciales de vacunación entre especies y territorios, evaluando su repercusión sobre la transmisión intersectorial y la resiliencia de los ecosistemas frente a presiones epidemiológicas y climáticas (17). Los modelos dinámicos constituyen además instrumentos de gobernanza anticipatoria. Al permitir la simulación de escenarios hipotéticos, facilitan la toma de decisiones basada en la evidencia, optimizando la asignación de recursos y fortaleciendo la planificación preventiva (18).

Los modelos dinámicos son **herramientas de gobernanza anticipatoria**:

- Transforman datos dispersos → conocimiento útil.
- Permiten planificar con anticipación bajo escenarios de incertidumbre.
- Son esenciales para una **estrategia *One Health* en un clima cambiante**.

En síntesis, los modelos dinámicos no deben considerarse simples ejercicios matemáticos, sino herramientas estratégicas para la gestión integral del riesgo. Su potencial para integrar información dispersa, explorar futuros alternativos y evaluar políticas públicas bajo distintos

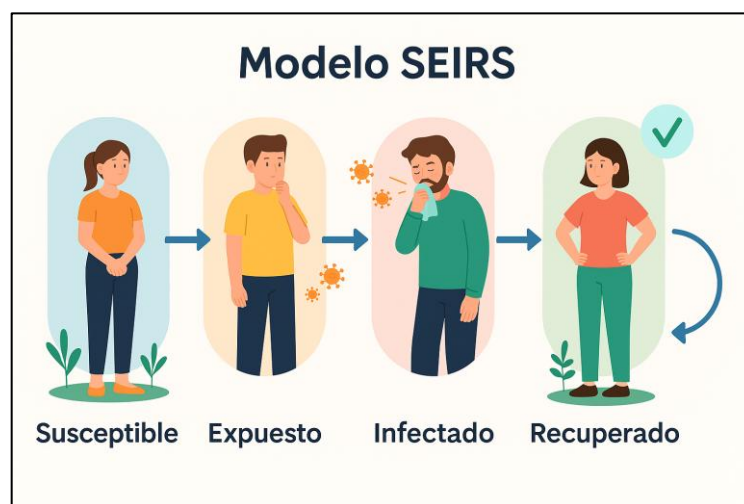
contextos climáticos los convierte en un componente central para la predicción y mitigación de amenazas zoonóticas (16).

1.4. Contexto de modelos dinámicos para anticipar escenarios.

1.4.1. Modelos dinámicos y epidemiología matemática

Ante esta complejidad, los modelos dinámicos se han convertido en una herramienta esencial para anticipar riesgos epidemiológicos y evaluar escenarios alternativos. En la epidemiología matemática, los modelos compartimentales —como el SEIRS (susceptibles, expuestos, infectados, recuperados y susceptibles)— permiten describir de manera estructurada la transmisión de agentes infecciosos, integrando factores biológicos y ambientales (15). Estos modelos pueden incorporar variables climáticas, como temperatura y precipitación, para capturar los efectos del cambio climático sobre los parámetros de transmisión y replicación de los patógenos.

Figura 1. *Dinámica del modelo epidemiológico SEIRS.*



Fuente: Elaboración propia con base en la bibliografía consultada, incluyendo estudios de modelado dinámico en salud pública y epidemiología utilizando Vensim (19,20). Creada con recurso visual complementario.

En la actualidad, han surgido extensiones más complejas como el modelo SEIVD (Susceptibles–Expuestos–Infectados–Vacunados–Fallecidos), el cual permite representar con mayor precisión la dinámica de enfermedades que incorporan procesos de inmunización (natural o

inducida) y mortalidad específica asociada. Este modelo ofrece ventajas para la planificación de intervenciones de salud pública, al estimar el impacto de estrategias de vacunación, tasas de letalidad y posibles mutaciones del agente infeccioso (15,21).

En la práctica, los modelos pueden tomar diversas formas según el fenómeno de interés:

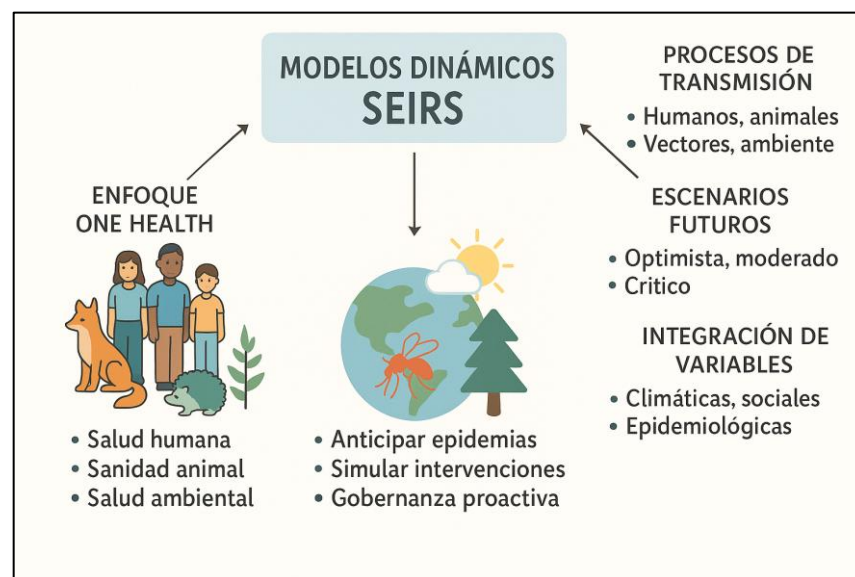
- Modelos vector–hospedero (SEI–SEIR) con estacionalidad; permiten modificar la competencia vectorial, la supervivencia y la tasa de picadura como funciones de la temperatura y la humedad (18,22).
- Modelos metapoblacionales y de movilidad que conectan territorios (urbano–rural) mediante matrices de viaje; útiles para evaluar expansión geográfica y efectos de conectividad (15,16).
- Modelos basados en agentes (ABM –Agent-Based Models) para representar heterogeneidad de contactos humano–animal–ambiente y comportamientos adaptativos (cumplimiento de control, migración estacional)(16).
- Enfoques de datos asimilados (p. ej., filtros de Kalman/partículas) para ajustar parámetros en tiempo real con vigilancia entomológica, clínica y climática(16). El uso combinado del SEIRS y del SEIVD, complementado con enfoques basados en agentes, permite generar escenarios híbridos donde las dinámicas de infección, vacunación, pérdida de inmunidad y mortalidad se integran en un mismo marco sistémico, aportando robustez predictiva y utilidad para la gobernanza anticipatoria (15,23).

El modelo SEIRS permite operacionalizar este enfoque incorporando los factores sociales determinantes de la salud -DSS; tanto los de carácter estructural, como los intermedios y proximales, pudiendo mencionarse entre ellos los siguientes:

- Factores climáticos extremos (sequías, lluvias intensas, deslizamientos, inundaciones, maremotos, alteración de los ecosistemas costeros y pérdida de manglares).
- Factores ecológicos (biodiversidad, deforestación, introducción o desplazamiento de especies invasoras, cambios en la dinámica de vectores y reservorios (mosquitos, roedores, murciélagos), resistencia antimicrobiana en fauna silvestre y doméstica.

- Factores sociales y sanitarios (migración, pobreza, acceso a salud, vivienda, grado de escolaridad, ubicación geográfica, desigualdad socioeconómica y exclusión social, migraciones internas y transfronterizas por conflictos o desastres, acceso desigual a servicios de salud, agua potable y saneamiento)

Figura 2. SEIRS: Un Modelo Predictivo para la Salud Humana, Animal y Ambiental.



Fuente: Elaboración propia con base en la bibliografía consultada, incluyendo estudios de modelado dinámico en salud pública y epidemiología utilizando Vensim (19,20). Creada con recurso visual complementario.

El modelo SEIRS, como sistema dinámico incluye fundamentalmente:

- **Rutas o vías de transmisión heterogéneas, diversas:** contacto directo e indirecto, vectores (mecánicos y biológicos), y la exposición ambiental.
- **Variables exógenas:** temperatura, precipitación, humedad, cobertura vegetal, urbanización, acceso a servicios de salud.
- **Lazos de retroalimentación:** inmunidad adquirida, reinfección, impacto de intervenciones.
- **Simulación paramétrica:** exploración y análisis de diferentes opciones de escenarios epidemiológicos: optimistas, intermedios y críticos.

Estas características permiten anticipar patrones epidémicos y evaluar la efectividad de estrategias como la prevención (vacunación), el control vectorial o y mitigación de factores de riesgo ambiental (20). En este contexto, los modelos SEIRS permiten:

- Predecir brotes en función de la variabilidad climática.
- Identificar puntos críticos de transmisión asociados a cambios en el uso del suelo.
- Evaluar el impacto de la movilidad humana y las prácticas socioculturales sobre la difusión de enfermedades.
- Diseñar estrategias de prevención y control basadas en evidencia (24,25).

1.5. Vensim como Herramienta para Simular Escenarios Epidemiológicos con el Modelo SEIRS y Enfoque *One Health*.

Vensim es una herramienta basada en dinámica de sistemas que permite construir modelos causales y de flujo con comportamiento no lineal, múltiples bucles de retroalimentación y variación temporal (19). En el marco de esta investigación, su aplicación se orienta específicamente a la rabia canina, modelando su transmisión y control mediante una estructura SEIRS - SEIVD e integrando componentes *One Health* (salud animal, salud humana y ambiente) para explorar escenarios de riesgo e intervención. Se basa en tres principios fundamentales:

1. **Modelado de procesos no lineales aplicados a la rabia canina:**

Vensim permite representar la dinámica no lineal de la rabia canina, en la cual las relaciones entre las variables no siguen una progresión directa, sino que dependen de múltiples factores interdependientes. Estos incluyen **factores de riesgo (FR)** —como densidad canina, cobertura vacunal insuficiente, movilidad de perros, condiciones ambientales y climáticas— y **factores protectores (FP)** —como campañas sostenidas de vacunación, control poblacional, vigilancia epidemiológica y educación comunitaria—, cuya interacción condiciona la transmisión y persistencia del virus.

2. **Retroalimentación y causalidad en la transmisión de la rabia:**

El enfoque de dinámica de sistemas permite identificar cómo las variables del modelo SEIRS - SEIVD influyen entre sí mediante relaciones causales directas y a través de **bucles de retroalimentación positivos y negativos**. En el caso de la rabia canina, estos bucles reflejan procesos como el aumento de la transmisión asociado a poblaciones susceptibles no vacunadas (retroalimentación positiva) y la reducción de casos derivada del incremento de la cobertura vacunal y la remoción de individuos infectados (retroalimentación negativa), integrando así dimensiones animales, humanas y ambientales propias del enfoque *One Health*.

3. **Simulación de escenarios futuros para la toma de decisiones en salud pública:**

Vensim posibilita la proyección de distintos escenarios epidemiológicos futuros de rabia canina mediante la simulación de intervenciones específicas, tales como variaciones en la cobertura y periodicidad de la vacunación, cambios en la dinámica poblacional canina, fortalecimiento de la vigilancia o modificaciones en factores ambientales. Estos escenarios permiten evaluar el impacto potencial de políticas públicas, la participación de distintos actores institucionales y comunitarios, y estrategias de control orientadas a la prevención de la rabia en humanos y animales.

La figura No. 3, ilustra el funcionamiento de **Vensim** como una herramienta de modelado de sistemas dinámicos aplicada al análisis de problemas complejos en salud pública. En el centro se muestra una interfaz computacional donde se representan diagramas de flujo, variables y simulaciones gráficas, lo cual permite visualizar las relaciones entre los componentes del sistema.

A su alrededor, la imagen destaca diferentes áreas de aplicación clave que interactúan con el modelo:

- **Epidemiología:** para comprender la distribución y propagación de enfermedades transmisibles (infecto-contagiosas) y los efectos de intervenciones sanitarias.
- **Salud humana:** tanto a nivel individual, como colectivo y poblacional.

- **Sanidad animal:** aspecto fundamental para el enfoque “Una Sola Salud” (*One Health*). Pudiendo analizar y abordar diferentes especies animales; vertebrados, invertebrados, mamíferos, aves, caninos, felinos, bovinos, equinos, entre otras.
- **Factores ambientales:** como el cambio climático, la contaminación del aire o de los recursos hídricos, residuos sólidos, entre otros.
- **Factores sociales:** incluyendo el comportamiento humano, la cultura, la economía o la educación.

Figura 3. Vensim (Ventana Simulation) como Sistema Dinámico.



Fuente: Elaboración propia con base en la bibliografía consultada, incluyendo estudios de modelado dinámico en salud pública y epidemiología utilizando Vensim (19,20). Creada con recurso visual complementario.

La visualización enfatiza que la salud pública no puede ser entendida, ni gestionada de forma aislada, sectorial; sino que requiere, por el contrario de un enfoque **sistémico, integral, holístico, interdisciplinario e intersectorial**, donde las decisiones en un sector impactan en otros de forma directa o indirecta. Vensim permite representar esta complejidad y probar diferentes escenarios antes de implementar políticas públicas, estrategias y programas en situaciones reales.

2. Justificación

Colombia enfrenta desafíos únicos en la gestión de zoonosis debido a su ubicación tropical, alta biodiversidad y economía con fuerte base agropecuaria. La presión antrópica sobre ecosistemas —deforestación, fragmentación de hábitats y expansión agrícola— modifica la distribución de vectores y reservorios, incrementando las oportunidades de transmisión humanos (2,26). El cambio climático está alterando patrones de temperatura y precipitación que favorecen la expansión geográfica de enfermedades zoonóticas, especialmente aquellas transmitidas por vectores o reservorios silvestres (3,10,11).

El sistema de vigilancia y control de zoonosis en Colombia enfrenta desafíos estructurales: subregistro de casos, debilidades en la articulación entre los sectores salud y sanidad animal, limitada capacidad diagnóstica en zonas rurales, y escasa integración de información ambiental en la toma de decisiones (10,11). Por ello, abordar esta problemática requiere estrategias intersectoriales, prospectivas y basadas en evidencia científica.

A pesar de los avances en vigilancia epidemiológica, Colombia carece de herramientas predictivas que integren de manera sistemática datos climáticos, ecológicos y sanitarios para anticipar brotes zoonóticos. Los sistemas tradicionales de vigilancia, como el canal endémico, son principalmente reactivos y se basan en la notificación pasiva de casos, sin capacidad de exploración prospectiva ni evaluación contrafactual de intervenciones decisiones (10,11). Este enfoque limita la capacidad de anticipación y adaptación frente a escenarios cambiantes de riesgo epidemiológico.

El modelo SEIVD propuesto, incorpora temperatura, supervivencia viral y cobertura vacunal como variables interconectadas, permitiendo simular escenarios futuros y evaluar el impacto de intervenciones antes de su implementación.

A diferencia del modelo SEIR clásico, el SEIVD incluye el compartimento de vacunación (V) muerte específica (D), esenciales para enfermedades con inmunización artificial y letalidad del 100%, como la rabia. Esto permite evaluar coberturas vacunales críticas y tiempos óptimos de mediación (26-28).

En este contexto, se selecciona la rabia canina (ciclo urbano) como zoonosis prioritaria para el modelado, considerando su letalidad del 100% una vez iniciados los síntomas clínicos, la persistencia de focos urbanos y silvestres en el país, y la disponibilidad de datos epidemiológicos que permiten alimentar el modelo dinámico (29).

El presente trabajo de investigación propone desarrollar un modelo de sistemas dinámicos en Vensim® que integre estas variables bajo el enfoque *One Health*, permitiendo simular el impacto del cambio climático en la dinámica de zoonosis prioritarias en Colombia, con énfasis en rabia canina. Este modelo constituye una **herramienta de apoyo a la toma de decisiones**, no un sistema predictivo estricto, diseñado para explorar escenarios, identificar puntos críticos de intervención y evaluar la sensibilidad del sistema ante cambios en parámetros clave. Su naturaleza exploratoria permite anticipar tendencias generales y orientar estrategias de vigilancia, más que generar pronósticos determinísticos puntuales.

Este enfoque holístico contribuirá a fundamentar políticas públicas basadas en evidencia para la prevención y control de zoonosis. Los principales usuarios potenciales del modelo incluyen el Instituto Nacional de Salud (INS), secretarías de salud departamentales y municipales, el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA), y organismos de cooperación internacional como la Organización Panamericana de la Salud (OPS) (4,10).

La investigación tiene el potencial de generar insumos científicos aplicables, orientar estrategias de promoción, prevención, vigilancia y control adaptadas a contextos locales, fortalecer la cooperación interinstitucional y fomentar la investigación interdisciplinaria, protegiendo simultáneamente la salud de los animales, de las personas y del ambiente.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Analizar, a través de un **estudio exploratorio de simulación** con un modelo de dinámica de sistemas (SEIVD) implementado en Vensim®, el impacto del cambio climático sobre la dinámica de aparición, transmisión y distribución de la rabia canina del ciclo urbano en Colombia, para anticipar escenarios de riesgo y sustentar estrategias de prevención.

3.2. Objetivos específicos

- a) Identificar y parametrizar, en el modelo de Vensim, los principales factores climáticos, ecológicos y sociales que influyen en la transmisión de zoonosis bajo escenarios de cambio climático.
- b) Recolectar y organizar datos históricos y actuales que permitan alimentar las variables y parámetros del modelo.
- c) Construir un modelo de dinámica de sistemas (SEIVD) que representa las interacciones entre clima, animales y humanos, y permite proyectar escenarios de riesgo.
- d) Simular escenarios alternativos (optimista, moderado, crítico) y evaluar el impacto de diferentes políticas de mitigación y control sobre la dinámica de transmisión.
- e) Formular recomendaciones para la vigilancia y control de zoonosis basadas en los resultados de los escenarios simulados, integrando el enfoque *One Health*.
- f) Realizar una calibración y validación generales del modelo dinámico desarrollado, con el fin de verificar su coherencia estructural, su consistencia epidemiológica y su comportamiento global frente a los escenarios simulados.

4. Materiales y Métodos

4.1. Relación entre los modelos SEIRS y SEIVD: un marco compartido con aplicaciones diferenciadas

Los modelos compartimentales constituyen herramientas clave para el análisis de la propagación de enfermedades infecciosas. En este estudio se parte de la familia de modelos tipo SEIR, cuya selección depende de la historia natural del agente patógeno y de las intervenciones disponibles. Dado que la rabia canina presenta una letalidad del 100 % y no admite recuperación clínica, el modelo implementado adopta una formulación **SEIVD**, en la cual la vacunación se representa mediante un compartimento específico y la muerte por rabia constituye una remoción irreversible del sistema. Esta elección permitió representar de manera más realista la dinámica epidemiológica de la rabia canina y evaluar, mediante simulación, el impacto de estrategias preventivas bajo distintos escenarios.

4.1.1. Modelo SEIRS: Infecciones con inmunidad temporal.

Complementando lo analizado en el punto inmediatamente anterior, el modelo SEIRS es apropiado cuando la enfermedad confiere inmunidad temporal, permitiendo reinfecciones, y cuando la mortalidad es baja o moderada. Se utiliza para enfermedades como la leptospirosis, donde es posible que los individuos recuperados vuelvan a ser susceptibles con el tiempo. Además, el modelo permite representar interacciones entre múltiples especies bajo el enfoque *One Health*, como humanos, caninos y bovinos (27).

4.1.2. Modelo SEIVD: Alta letalidad y control con vacunación.

Por el contrario, el modelo SEIVD es ideal para enfermedades de alta letalidad, como la rabia, que no permiten recuperación funcional. Incluye a cambio los estados de vacunación y muerte, lo que permite modelar escenarios donde se implementan campañas de vacunación masiva y vigilancia post-exposición. También es útil cuando se quiere modelar reservorios silvestres y animales susceptibles sin posibilidades de recuperación (28).

4.1.3. Conexión entre SEIRS y SEIVD: una misma base estructural.

Aunque difieren parcialmente en la estructura, ambos modelos pertenecen a una misma arquitectura compartimental. La estructura se puede expandir o reducir según las características del agente etiológico. Por ejemplo, SEIVD puede considerarse una extensión del SEIRS para condiciones específicas como inmunización o alta letalidad. Ambos modelos pueden implementarse en Vensim o herramientas similares y adaptarse a diferentes zoonosis como la leptospirosis o la rabia (26), donde el compartimento de Recuperados se sustituye por uno de Vacunados y otro de Muertos, adecuando la estructura a enfermedades sin recuperación clínica, como la rabia.

El modelo SEIVD debe entenderse como una derivación especializada del SEIRS. Ambos comparten una lógica dinámica común basada en estados de salud transicionales y tasas de cambio entre ellos. La elección entre uno u otro depende de la patogenia de la enfermedad, las características biológicas, inmunológicas y clínicas de la enfermedad que se desea modelar.

Tabla 1. Comparación de los modelos epidemiológicos SEIRS y SEIVD en contextos zoonóticos.

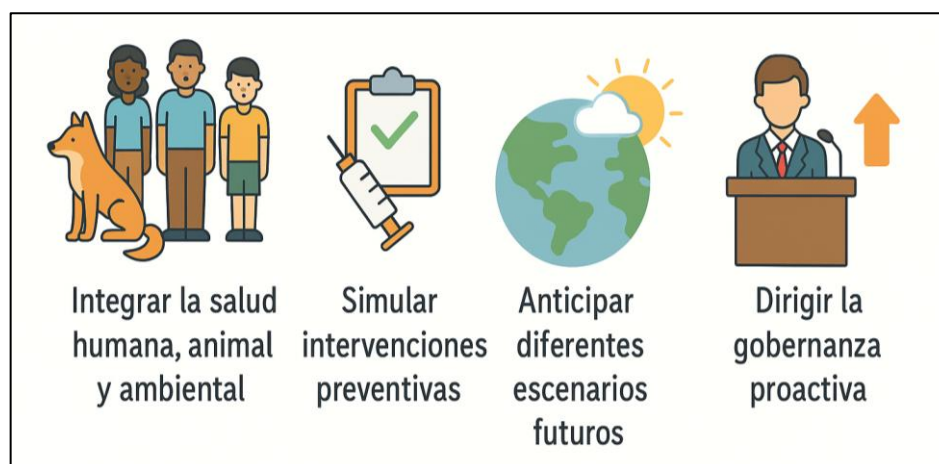
El modelo SEIRS se emplea para enfermedades con inmunidad temporal, mientras que el SEIVD se utiliza para enfermedades con alta letalidad.		
Modelo	SEIRS Susceptible, Expuesto, Infectado, Recuperado, Susceptible	SEIVD Susceptible, Expuesto, Vacunado, Fallecido
Uso	Enfermedades con la influenza 	Enfermedades como la rabia 
Variabilidad en las transiciones	Incorporación de personas recuperadas y susceptibles	Incorporación de individuos vacunados y fallecidos
Relación	Son variantes del mismo modelo utilizadas en contextos diferentes 	Son variantes del mismo modelo utilizadas en contextos diferentes 

Fuente: Elaboración propia producto de la búsqueda de bibliografía (27,28).
Creada con recurso visual complementario.

Esta infografía compara los modelos epidemiológicos compartimentales SEIRS y SEIVD, resaltando sus diferencias estructurales, aplicaciones clínicas y ventajas analíticas. El modelo SEIRS es útil para enfermedades con inmunidad temporal como la leptospirosis, incorporando la posibilidad de reinfección. El modelo SEIVD, por otro lado, se adapta a enfermedades con alta letalidad como la rabia, al incluir estados de vacunación y fallecimiento. Ambos modelos representan variaciones del mismo enfoque dinámico y permiten analizar la evolución de enfermedades bajo distintos escenarios sanitarios y zosanitarios.

4.2. Pasos Metodológicos con Enfoque *One Health* para el Desarrollo de Modelos SEIRS - SEIVD

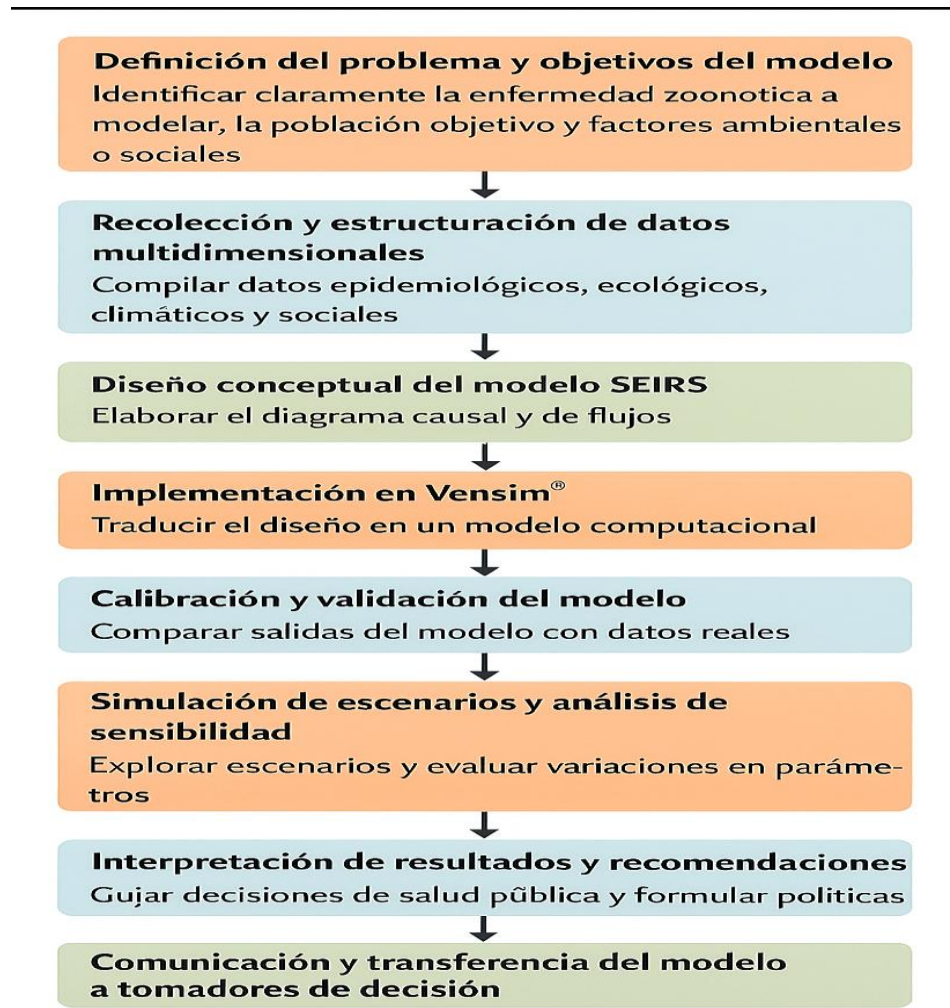
Figura 4. Desarrollo de Modelos SEIRS – SEIVD con Enfoque *One Health*.



Fuente: Elaboración propia con base en literatura sobre modelado SEIRS y dinámica de sistemas (30).
Creada con recurso visual complementario.

La actual figura resume visualmente las etapas clave para construir modelos SEIRS bajo el enfoque *One Health*; integrando entonces, la salud humana, la salud animal y la salud ambiental; y destaca el uso de herramientas de simulación como Vensim para evaluar intervenciones, anticipar escenarios futuros y apoyar una gobernanza sanitaria y zosanitaria proactiva basada en evidencia.

Figura 5. *Pasos Metodológicos para el Desarrollo de Modelos SEIRS- SEIVD con Enfoque One Health.*



Elaboración propia con base en literatura sobre modelado SEIRS - SEIVD y dinámica de sistemas (30).
Creada con recurso visual complementario.

El presente diagrama detalla de forma estructurada y visual los ocho pasos esenciales utilizados en la construcción del modelo dinámico tipo SEIVD integrando el enfoque *One Health*. Cada etapa combino elementos epidemiológicos, ecológicos y climáticos, desde la definición del problema hasta la transferencia del modelo a tomadores de decisión desde lo técnico, destacando la utilidad de herramientas como Vensim para la simulación y análisis de escenarios complejos en salud pública poblacional.

4.2.1. Definición del problema y objetivos del modelo.

Esta etapa inicial consistió en delimitar con precisión la enfermedad zoonótica estableciendo los objetivos específicos del modelo. Fue fundamental definir la población susceptible (animal), el entorno ecológico, los factores de riesgo, los factores protectores y las posibles rutas o vías de transmisión. Además, de identificar las preguntas de investigación: ¿El objetivo era el poder anticipar situaciones de riesgo, epidemias futuras mediante el análisis de datos dinámicos y factores multicausales?, ¿evaluar intervenciones sanitarias?, ¿determinar puntos críticos de transmisión? Esta claridad fue esencial para orientar todos los pasos subsiguientes del proceso de modelado (30).

Este modelo permitió integrar datos intersectoriales en salud pública humana, animal y ambiental, bajo la perspectiva *One Health*.

Selección de la rabia canina - ciclo urbano como zoonosis prioritaria.

La rabia es una zoonosis viral aguda, prevenible por vacunación, con una letalidad del 100% una vez iniciados los síntomas clínicos. Es causada por el virus de la rabia (género *Lyssavirus*) y se transmite principalmente a través de mordeduras, arañazos y lameduras de animales infectados. En Colombia, la rabia es considerada una prioridad en salud pública por ser una enfermedad infecciosa que causa una encefalitis aguda tanto en personas como en animales.

Dada su dinámica multiespecie, su carga letal y la importancia de intervenciones como vacunación masiva y vigilancia en fauna silvestre, la rabia es ideal para ser modelada con un enfoque SEIVD (Susceptible, Expuesto, Infectado, Vacunado, Muerto), que capture la evolución de individuos sin posibilidad de recuperación. A nivel mundial, los principales transmisores son los perros y los gatos, razón por la cual la vacunación de estas especies es clave para su prevención y control.

4.2.2. Recolección y estructuración de datos multidimensionales.

Se integraron datos provenientes de fuentes confiables e intersectoriales para alimentar el modelo con variables relevantes, validadas y actualizadas; necesarias para robustecer su capacidad predictiva. Estos incluyen datos epidemiológicos (incidencia, duración de fases

clínicas, tasas de transmisión, coberturas de vacunación), climáticos (temperatura, contacto perro - perro). La consistencia, calidad, veracidad y periodicidad de estos datos condicionan la capacidad predictiva del modelo.

Ante la presencia de datos faltantes o inconsistencias entre fuentes, se recurrió a procesos de depuración, armonización y validación cruzada, complementados con el uso de valores promedio, rangos reportados en la literatura y supuestos explícitos del modelo, documentados para su evaluación durante la fase de calibración y simulación exploratoria.

Las variables demográficas de la población canina (tamaño poblacional, tasas de natalidad, número de casos y mortalidad) se fundamentaron en estimaciones oficiales del MSPS/INS y en estudios de demografía canina en América Latina. Para la profundización de los variables utilizadas en el modelo, remitirse al Anexo E: Diagramas y parámetros epidemiológicos y ambientales utilizados para las simulaciones de los diferentes escenarios.

A continuación se copia enlace de la página web del Ministerio de Salud y Protección Social, de donde se extrajo gran parte de la información utilizada en la modelación del SEIVD de rabia: [https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Paginas/results.aspx?k=\(\(dcispartof:%22Zoonosis%20-%20Departamento%20y%20municipio%22\)\)](https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Paginas/results.aspx?k=((dcispartof:%22Zoonosis%20-%20Departamento%20y%20municipio%22))). De acá se tomó información del periodo comprendido entre 2020 y 2024. Con la posibilidad de analizar información de forma global del país, o por departamentos y municipios. (31-35).

Una de las fuentes más utilizadas del INS corresponde al protocolo de la vigilancia integrada de la rabia: https://www.ins.gov.co/buscador-eventos/Lineamientos/Pro_Vigilancia%20Integrada%20Rabia.pdf.

Para la información de carácter ambiental, se procedió a investigar entre otras fuentes; la página web de la autoridad nacional competente: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales: https://www.ideam.gov.co/sites/default/files/prensa/boletines/2024-07-19/05_informe_prediccion_climatica_jas_2024.pdf.

4.2.3. Diseño conceptual del modelo SEIRS - SEIVD

Se logró sintetizar visualmente la estructura causal y dinámica del sistema epidemiológico de la rabia canina – ciclo urbano, integrando aspectos de salud humana, salud animal y variables ambientales.

Cada compartimento animal/canino describe un estado epidemiológico específico:

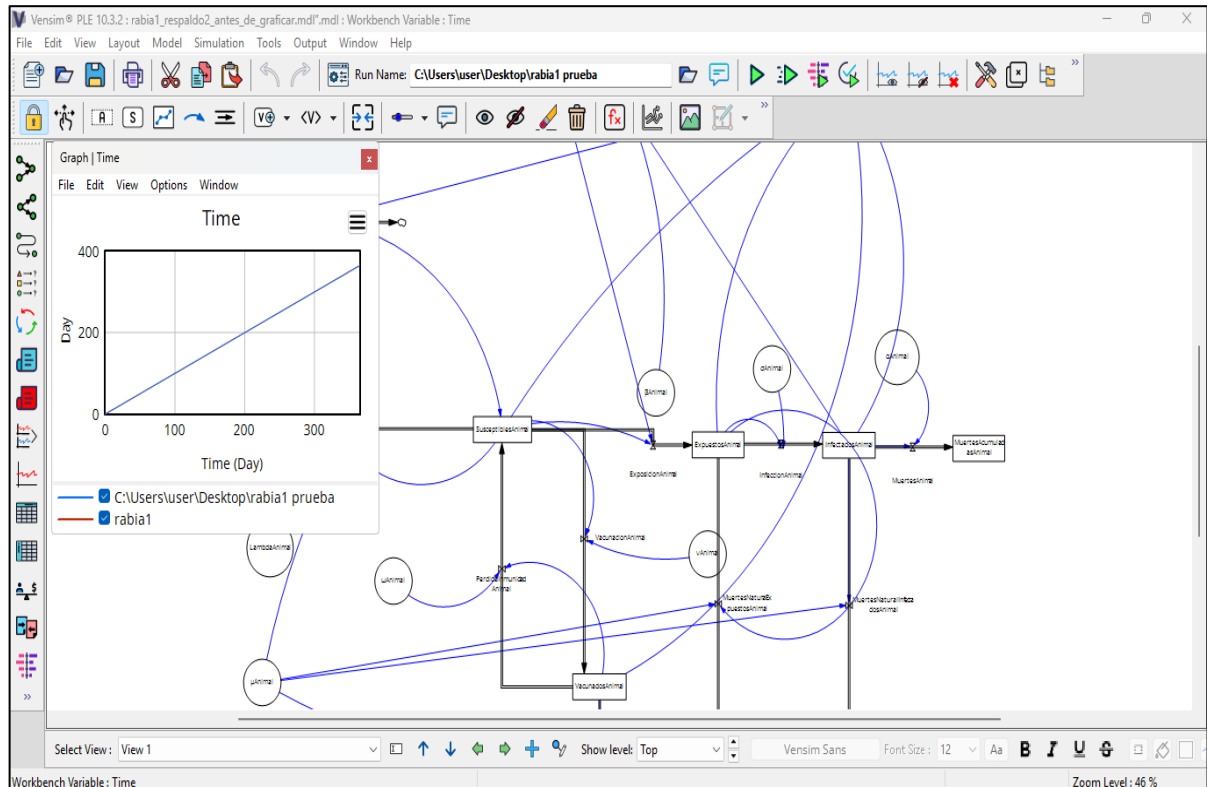
- **S (Susceptibles):** animales sanos con riesgo de infección.
- **E (Expuestos):** animales que han adquirido el virus y se encuentran en período de incubación; aún no transmiten.
- **I (Infectados):** animales en fase clínica, altamente transmisores, con una letalidad del 100 %.
- **V (Vacunados):** animales inmunizados temporalmente mediante campañas antirrábicas.
- **D (Muertos):** acumulación de muertes por infección rábica.

Esta distribución poblacional se ajusta a la historia natural de la rabia canina, caracterizada por una letalidad del 100 % y la ausencia de recuperación clínica una vez instaurada la enfermedad.

El esquema a continuación muestra y explica de forma gráfica los diferentes componentes y relaciones entre estos, como son los compartimientos (stocks - rectángulos), flujos y válvulas (color negro) por donde se distribuye la población según su estado de salud y enfermedad, variables auxiliares y constantes (circulares), y flechas de causalidad (azules).

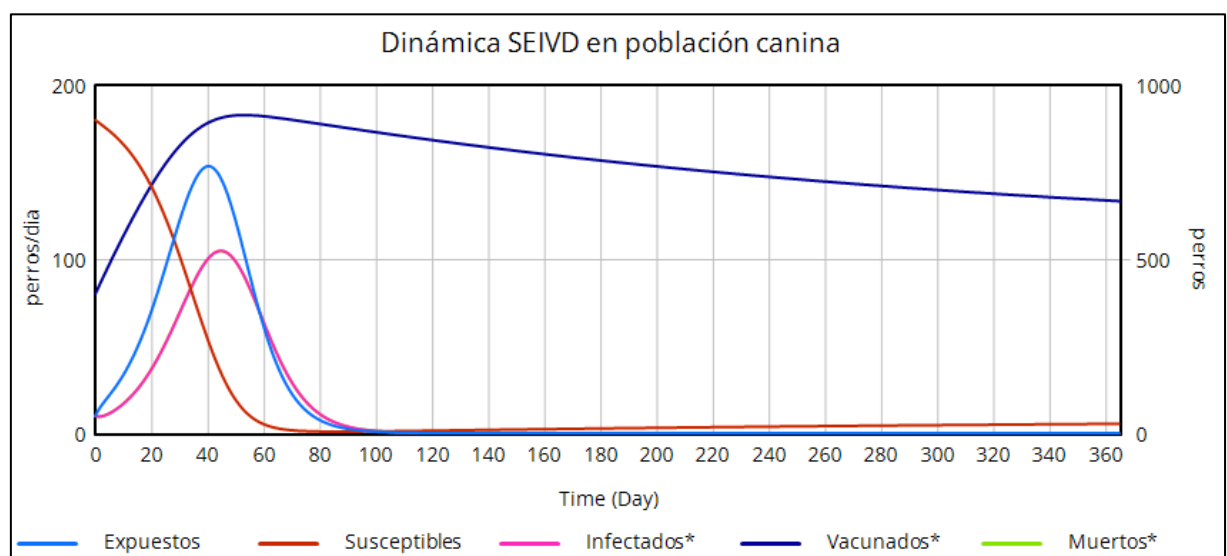
Detrás de este diagrama y modelo se encuentra la información histórica (promedio 4 años) de cada una de las variables, información epidemiológica y programación matemática; para finalmente definir las ecuaciones con las cuales se realizaron las diferentes simulaciones ante potenciales situaciones, determinantes, factores de riesgo, factores protectores de la enfermedad; información definitiva para la toma de decisiones en salud pública.

Figura 6. Captura de pantalla submodelo animal SEIVD rabia ciclo urbano



Fuente: Elaboración propia a partir del modelo SEIVD desarrollado en Vensim PLE 10.3.2.

Figura 7. Captura de pantalla dinámica SEIVD de la población canina durante 360 días



Fuente: Elaboración propia a partir del modelo SEIVD desarrollado en Vensim PLE 10.3.2.

Captura de pantalla que se adjunta con el propósito de mostrar un ejemplo de cómo se grafica la información a través de las diferentes variables, para su posterior consolidación, análisis, interpretación e insumos para la toma de decisiones en salud pública de carácter político y técnico a nivel nacional y territorial.

Y para el caso de la población humana, los compartimientos corresponden a:

- **S (Susceptibles):** Personas sanas sin inmunidad contra el virus rábico. Incluye población general y personas en riesgo ocupacional. Pueden infectarse si tienen contacto con animales rabiosos.
- **E (Expuestos):** Personas que han sufrido una mordedura, rasguño o contacto de mucosas con saliva de un animal confirmado de rabia. Están en periodo de incubación y no transmiten la enfermedad. Aquí puede aplicarse profilaxis posexposición (PEP).
- **I (Infectados):** Personas que ya desarrollaron rabia clínica (encefalitis rábica). La enfermedad es 100 % fatal y no existe transmisión humano–humano.
- **V (Vacunados):** Personas inmunizadas mediante: vacunación preventiva (PrEP), o vacunación posexposición (PEP). La inmunidad puede ser temporal según el esquema recibido.
- **D (Muertos):** Acumulación de fallecimientos por rabia clínica. Es un estado final y absorbente del modelo.

4.2.4. Implementación en Vensim.

El diseño conceptual se traduce en un modelo matemático formal en la plataforma Vensim. Se construyeron las ecuaciones diferenciales o funciones de transición para cada una de las variables (stocks, flujos, válvulas, auxiliares, constantes), definiendo las relaciones causales y asignando los valores iniciales y parámetros respectivos. Estos se tomaron tanto de la literatura científica, como de fuentes oficiales de carácter nacional y territorial. La plataforma permite por ende construir diagramas de flujo, simular dinámicas temporales y realizar análisis

estructurales, con diferentes escalas de modelamiento territorial; nacional, departamental, municipal.

Tabla 2. *Parámetros del modelo SEIVD para rabia canina en Colombia*

Parámetro	Descripción	Unidad	Valor mínimo	Valor máximo	Fuente
B	Tasa de transmisión perro–perro	día ⁻¹	0,20	0,80	(36,37).
Σ	Progresión de expuesto a infectado (1/incubación)	día ⁻¹	1/30	1/7	(38).
Γ	Remoción/muerte clínica por rabia	día ⁻¹	1/7	1/3	(39).
N	Tasa de vacunación	día ⁻¹	0,001	0,05	(40,41).
Ω	Pérdida de inmunidad vacunal	día ⁻¹	1/1095	1/365	(41).
M	Mortalidad natural canina	día ⁻¹	1/3650	1/1825	(40).
Λ	Tasa de entrada/natalidad poblacional	perros/día	Depende de calibración	Depende de calibración	(29,43).
N	Tamaño poblacional canino inicial	perros	300 000	500 000	(31-35).
T	Rango térmico utilizado en el modelo	°C	18	32	(42).
kT	Coefficiente modulador de temperatura	adimensional	0,0	0,3	(42).
pV	Cobertura vacunal anual estimada	proporción	0,30	0,80	(39).
dl	Duración infecciosa media	días	3	7	(39).

Fuente: Elaboración propia con base en literatura científica (INS, OMS/OPS) utilizados en las simulaciones.

La Tabla 2 resume los parámetros fundamentales empleados en la formulación del modelo SEIVD para la dinámica de la rabia canina en Colombia, especificando sus rangos mínimos y máximos de acuerdo con la evidencia epidemiológica disponible. Estos valores representan intervalos plausibles que capturan la variabilidad biológica, demográfica y operacional observada en escenarios reales.

La tasa de transmisión (**β**) se ubicó entre 0,20 y 0,80 día⁻¹, un rango ampliamente utilizado en modelos compartimentales para rabia que permite representar desde condiciones moderadas hasta situaciones de alta transmisibilidad (37,38). Las transiciones clínicas correspondientes al período de incubación (**σ**) y al curso infeccioso (**γ**) se expresan como inversos del tiempo, reflejando duraciones descritas para la rabia en perros en estudios experimentales y de campo (40,41).

Los parámetros de vacunación (ν) y pérdida de inmunidad (ω) incorporan la estacionalidad operativa de las campañas y la naturaleza temporal de la inmunidad conferida, consistente con la literatura sobre la duración de la protección vacunal (40,41).

Asimismo, los parámetros demográficos (μ , Λ , N) permiten representar la dinámica poblacional canina en entornos urbanos y rurales, integrando estimaciones oficiales del MSPS/INS y estudios de demografía regional.

Finalmente, los modificadores ambientales (T , kT) incorporan el efecto indirecto de la temperatura sobre el comportamiento canino y la estabilidad viral, siguiendo el *enfoque One Health* que articula factores ecológicos y climáticos (40,41).

En resumen, este conjunto de parámetros proporciona una base coherente, trazable y biológicamente fundamentada para las simulaciones realizadas, y permite desarrollar análisis de sensibilidad y calibración que reflejan la incertidumbre inherente a los sistemas epidemiológicos complejos.

En los modelos epidemiológicos compartimentales, varias transiciones —como la progresión de expuesto a infectado (σ), la duración del periodo infeccioso (γ) o la pérdida de inmunidad (ω)— se expresan como tasas en unidades de **1/días** porque representan la *probabilidad promedio diaria* de que un individuo cambie de estado.

Esta formulación deriva del hecho de que dichos procesos corresponden a intervalos temporales bien definidos, típicamente descritos como “el periodo dura X días”. Matemáticamente, convertir un tiempo promedio T en una tasa se logra mediante su inverso ($1/T$), lo que permite integrar la duración biológica del fenómeno en ecuaciones diferenciales continuas.

Por ejemplo, si el periodo de incubación es de 30 días, su tasa de progresión es $1/30 \text{ día}^{-1}$, lo que indica que, en promedio, un 3,3 % de la población expuesta progresa cada día. Esta aproximación es estándar en la epidemiología matemática porque facilita la representación

dinámica de eventos biológicos, permite comparaciones entre estudios y asegura consistencia dimensional dentro del sistema de ecuaciones (40,41).

Lógica epidemiológica del flujo SEIVD

a) Transmisión perro–perro

La transmisión ocurre por mordedura, arañazo o lamedura debido a la alta concentración viral en la saliva durante la fase clínica (29,39). Por ello, la tasa de infección se modela como:

$$\beta \cdot S \cdot I$$

Similar a los modelos aplicados por Zinsstag et al. y Hampson et al. en estudios de África y Asia (36,37).

b) Periodo de incubación

El valor de σ deriva de estudios que establecen que el periodo de incubación en perros oscila entre 7 y 30 días (38).

c) Letalidad del virus

La rabia presenta letalidad del 100% en perros clínicamente infectados. Investigaciones de fisiopatología han demostrado que no existe recuperación natural (39). Por ello, los infectados progresan al compartimento **D** con tasa γ .

d) Vacunación y pérdida de inmunidad

Estudios de duración de inmunidad vacunal muestran protección que puede durar entre 1 y 3 años, dependiendo del protocolo y tipo de vacuna (45,46). Esto justifica la inclusión de la tasa ω que retorna a los vacunados al estado susceptible.

e) Demografía canina

Parámetros demográficos, incluido el tamaño poblacional N y la tasa de ingreso Λ , se sustentan en estudios regionales de demografía canina.

Ecuaciones diferenciales del modelo

Las ecuaciones utilizadas están alineadas con los modelos epidemiológicos aplicados internacionalmente para rabia canina (36,37).

Ecuación 1. Ecuaciones diferenciales del modelo

Compartimento	Ecuación
Susceptibles	$\frac{dS}{dt} = \Lambda - \beta SI - \nu S + \omega V - \mu S$
Expuestos	$\frac{dE}{dt} = \beta SI - \sigma E - \mu E$
Infectados	$\frac{dI}{dt} = \sigma E - \gamma I - \mu I$
Vacunados	$\frac{dV}{dt} = \nu S - \omega V - \mu V$
Removidos	$\frac{dD}{dt} = \gamma I$

Fuente. Información tomada de (36,37).

Ejemplo del compartimento **Expuestos**, siguiendo metodología de Gumel et al. (estructura estándar SEIR) adaptada a rabia canina:

Expuestos = INTEG(Infecciones - Progresion - Muertes_E , E0)

Infecciones = beta * Susceptibles * Infectados

Progresion = sigma * Expuestos

Muertes_E = mu * Expuestos

Este enfoque permite trazabilidad de cada flujo epidemiológico, facilitando calibración y sensibilidad.

Procedimiento de parametrización y calibración

La parametrización combinó literatura, datos nacionales del Instituto Nacional de Salud y del Ministerio de Salud y Protección Social, y teoría epidemiológica clásica:

Selección de rangos (Tabla 2) con base en estudios epidemiológicos y demográficos (36,37).

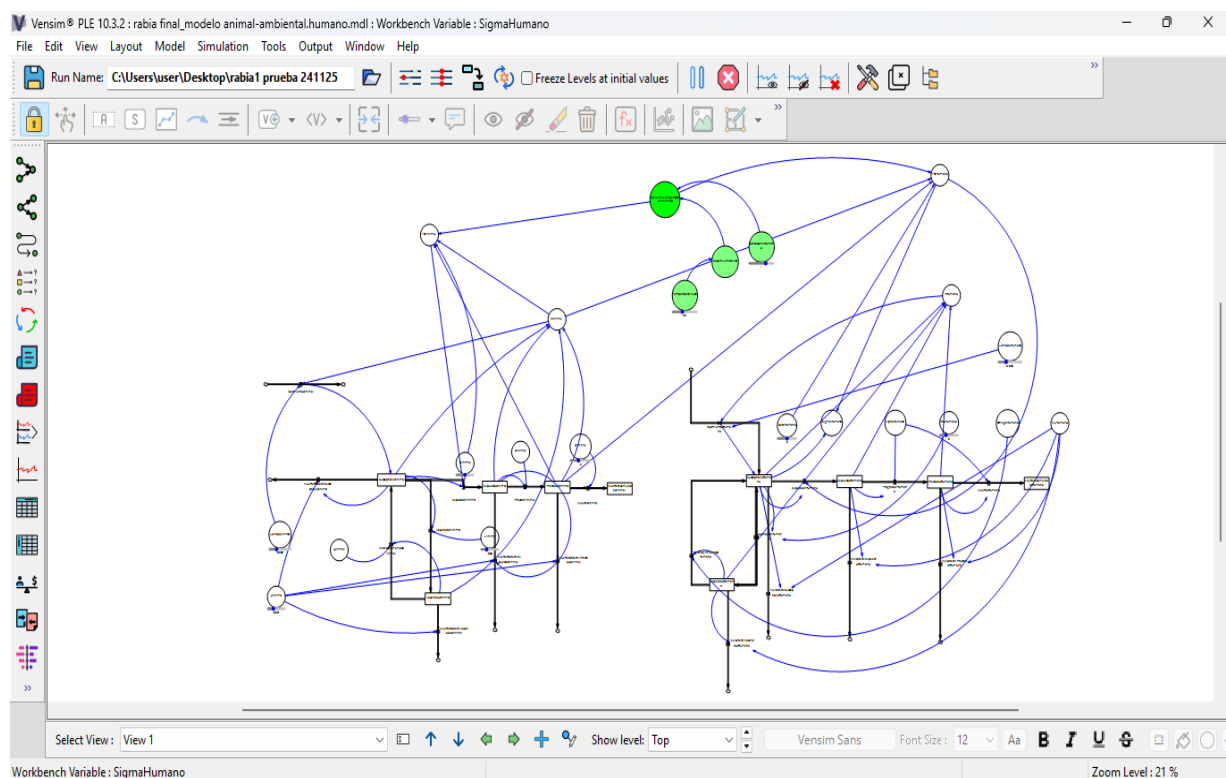
Equilibrio demográfico, ajustando Λ según datos regionales de población canina.

Ajuste preliminar de transmisión, replicando escenarios descritos en Zinsstag et al. y Hampson et al. (36,37).

Análisis de sensibilidad, identificando β , v y σ como parámetros más influyentes, en concordancia con estudios internacionales (36,37).

Preparación para calibración, utilizando datos Ministerio de Salud y Protección Social 2020–2024 (29,43).

Figura 8. Captura de pantalla Modelo SEIVD rabia bajo el enfoque de One Health



Fuente. Elaboración propia modelación sistema dinámico vensim

La presente figura ilustra la diagramación del modelo, conformado como se ha mencionado anteriormente por tres submodelos: animal, ambiental y humano. La modelación se desarrolló en **Vensim PLE 10.3.2**, empleando una resolución temporal diaria y parámetros calibrados con datos históricos de la situación nacional de la rabia urbana/canina en Colombia y de literatura científica, tanto nacional como internacional; permitiendo por lo tanto simular la dinámica de transmisión durante un horizonte temporal de **360 días, con un seguimiento**

de cada 6 horas, evaluar la incidencia esperada y estimar la respuesta del sistema frente a variaciones en tasas de transmisión, vacunación y pérdida de inmunidad.

Escenarios epidemiológicos y climáticos simulados

Tabla 3. Información general para las diferentes simulaciones

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad	Descripción
Población animal total	(N_{Animal})	6 289 122	Perros	Tamaño estimado de la población canina.
Población vacunada inicial	(Vacunados)	3 828 581	Perros	Refleja coberturas promedio del país.

Fuente: Elaboración propia con información analizada del INS y MSPS

Tabla 4. Comparación estructural y epidemiológica entre el submodelo animal y el submodelo humano en el sistema SEIVD de rabia

Aspecto	Submodelo Animal (Perros)	Submodelo Humano
Rol epidemiológico	Principal reservorio y transmisor. Determina la persistencia y amplitud de la epidemia.	Hospedero terminal. No mantiene la transmisión.
Estructura del modelo	SEIVD completo: Susceptibles, Expuestos, Infectados, Vacunados y Muertes.	Modelo simplificado: Susceptibles, Expuestos, Infectados y Muertes (sin vacunación masiva).
Fuente principal de infección	Transmisiónperro $\leftrightarrow$ perro (mordeduras).	Exposición por mordedura, lamedura, rasguño de perro infectado (no hay transmisión persona-persona).
Fuerza de infección (FOI)	$FOI_{Animal} = \beta_{Animal} \times Infectados_{Animal} \times Factor_{Ambiental}$. Alta sensibilidad a β .	$FOI_{Humano} = \beta_{Humano} \times Infectados_{Animal}$. Depende totalmente de la dinámica animal.
Parámetros clave	β_{Animal} , contacto perro-perro, supervivencia viral, cobertura vacunal, tiempo de incubación (~45 días).	β_{Humano} , probabilidad de exposición postmordedura, acceso a PEP, tiempo de incubación variable (20–60 días).
Intervenciones relevantes	Vacunación masiva, control poblacional, vigilancia canina, reducción de contacto.	Atención clínica oportuna, PEP, educación comunitaria, vigilancia epidemiológica.
Sensibilidad al clima	Alta: temperatura afecta supervivencia del virus y contacto entre perros.	Indirecta: depende del incremento de casos animales o cambios en comportamiento de perros.
Magnitud esperada del brote	Elevada: los perros pueden amplificar exponencialmente la transmisión.	Muy baja: casos esporádicos asociados a fallas en control animal o en acceso a PEP.
Interpretación en el modelo	Determina la dinámica del sistema completo: si sube la infección animal, todo el sistema se activa.	Refleja impacto en salud pública; indicador de riesgo y falla en prevención primaria.
Propósito en la modelación	Simular escenarios de transmisión real y capacidad de control epidemiológico.	Estimar riesgo humano y evaluar impacto de estrategias preventivas.

Fuente: Elaboración propia, con base en la estructuración del modelo SEIVD rabia

4.2.5. Calibración y validación del modelo.

La calibración y validación del modelo se orientaron a verificar su coherencia estructural y su plausibilidad epidemiológica. Para ello, las salidas simuladas se compararon con datos históricos disponibles, evaluando la concordancia en términos de tendencias generales, órdenes de magnitud y rangos esperados, más que una correspondencia exacta punto a punto. Como criterios de adecuación se consideraron la estabilidad del modelo, la ausencia de comportamientos no plausibles y la consistencia interna de las relaciones causales. Adicionalmente, el modelo fue revisado por expertos interdisciplinarios del Ministerio de Salud y Protección Social. Se reconoce que se requieren procesos adicionales de calibración y validación a nivel territorial y bajo escenarios ambientales diferenciados, los cuales no fueron abordados en esta fase por limitaciones de tiempo y alcance.

4.2.6. Simulación de escenarios y análisis de sensibilidad.

El modelo permitió explorar diferentes escenarios bajo condiciones cambiantes: con o sin intervenciones (vacunación), y bajo distintas condiciones climáticas. El análisis de sensibilidad evaluó el impacto de pequeñas variaciones en los parámetros sobre los resultados, lo cual permite identificar variables críticas y diseñar políticas robustas.

Se simularon tres escenarios variando la cobertura vacunal, temperatura media, supervivencia viral y β_{Animal} , lo que permitió analizar la sensibilidad del sistema y su consistencia epidemiológica.

Tabla 5. Estructura y resultados de los diferentes escenarios simulados

Escenario	Cobertura (%)	Temperatura media (°C)	Supervivencia viral	β_{Animal}	Interpretación epidemiológica
Crítico	30 %	15 °C	1.0	8×10^{-7}	Coberturas insuficientes permiten circulación sostenida; temperaturas bajas favorecen mayor estabilidad viral en tejidos y saliva, aumentando probabilidad de exposición (47,48).
Moderado	60 %	22 °C	0.7	3×10^{-7}	Coberturas intermedias reducen parcialmente la transmisión. Temperatura templada coincide con actividad canina

Escenario	Cobertura (%)	Temperatura media (°C)	Supervivencia viral	β Animal	Interpretación epidemiológica
					sostenida, pero menor supervivencia extrínseca del virus (40,47).
Optimista	80 %	30 °C	0.3	1×10^{-7}	Altas coberturas vacúnales interrumpen la cadena de transmisión. Temperaturas cálidas aceleran la inactivación viral (47).

Fuente: Elaboración propia

4.2.7. Interpretación de resultados y formulación de recomendaciones.

Los resultados preliminares han sido interpretados en conjunto con expertos del Ministerio de Salud y Protección Social, identificando posibles opciones para guiar acciones en salud pública. Esto incluye la identificación de puntos críticos de intervención, formulación de políticas públicas de promoción de la salud, prevención de riesgos, vigilancia epidemiológica y sanitaria y, finalmente el control de factores de riesgo y el fortalecimiento de los factores protectores de dicha patología basada en evidencia, y la integración con estrategias intersectoriales. El modelo debe generar recomendaciones participativas, incluyentes, claras, viables y adaptadas al contexto local.

4.2.8. Comunicación y transferencia del modelo a tomadores de decisión.

Es clave traducir los hallazgos en herramientas accesibles y útiles para autoridades sanitarias. Esto puede incluir, un tablero de control interactivo, visualizaciones de escenarios tipo '¿Qué pasaría si...?', informes ejecutivos o módulos de capacitación. La utilidad del modelo se maximiza cuando es comprendido y apropiado por quienes definen las políticas públicas del orden nacional, departamental y municipal. Para esto se adelantó un espacio de trabajo el día 3 de diciembre del 2025, con los técnicos y profesionales encargados de liderar, y gestionar el programa nacional de prevención y control de zoonosis del Ministerio de Salud y Protección Social, Subdirección de Salud Ambiental. Este espacio permitió validar la pertinencia del modelo como herramienta de apoyo a la toma de decisiones en el marco del enfoque *One Health*, articulando niveles nacional y territorial. Ver anexo F. Acta reunión espacio de trabajo Ministerio de Salud y Protección Social.

5. Evaluación propuesta del Modelo SEIVD según dinámica de rabia canina en Colombia

El modelo SEIVD implementado en Vensim® no busca predecir el número exacto de casos de rabia canina, sino **representar el comportamiento del sistema** bajo distintas condiciones epidemiológicas y ambientales. En este sentido, el modelo permite:

- Representar **patrones dinámicos**: cómo se comporta el sistema ante cambios en temperatura, contacto perro–perro o cobertura vacunal.
- Comparar **escenarios alternativos**: por ejemplo, qué ocurre si el clima se enfría, si aumenta el contacto entre perros o si disminuye la vacunación.
- Identificar **puntos críticos** del sistema: zonas de amplificación de la transmisión y nodos de intervención prioritaria.
- Anticipar **tendencias generales**: más que estimar cuántos casos habrá, permite determinar si la infección tenderá a aumentar, disminuir o estabilizarse.

Por tanto, las salidas del modelo (p. ej., *InfectadosAnimal*, *CasosNuevosAcumulados*, etc.) deben interpretarse como **indicadores aproximados de dinámica y riesgo**, no como valores absolutos exactos.

5.1. Coherencia de los parámetros epidemiológicos y ambientales utilizados

La elección de la estructura SEIVD resulta particularmente adecuada para la rabia por tres características críticas ampliamente documentadas:

1. **Periodo de incubación prolongado y variable**, que puede oscilar entre 20 y 90 días en perros (37).
2. **Letalidad del 100 %**, lo que hace imprescindible incluir la transición desde el estado Infectado hacia el compartimento de Muertes (38).

3. **Transmisión no explosiva**, basada en contactos específicos (mordeduras, rasguños, lameduras); en consecuencia, la tasa de transmisión (β) suele ser relativamente baja en modelos de rabia urbana (38,39).

Los parámetros utilizados se sustentan en literatura nacional, regional y global, así como en datos oficiales del Instituto Nacional de Salud (INS) y del Ministerio de Salud y Protección Social (MSPS). Entre los elementos validados se destacan:

- **Tasa de transmisión β_{Animal}** , calibrada dentro de rangos descritos para rabia urbana (aprox. 10^{-6} a 10^{-8}) (38,39), considerando variaciones paramétricas exploratorias para examinar su efecto sobre el comportamiento global del modelo.
- **Periodo de incubación promedio ≈ 45 días**, consistente con reportes de la OPS y estudios epidemiológicos latinoamericanos.
- **Duración clínica ≈ 7 días**, concordante con la fase neurológica terminal descrita en rabia canina.
- **Letalidad del 100 %**, ampliamente aceptada en perros sin profilaxis posexposición (38,49).
- **Coberturas de vacunación** entre 30 % y 80 %, basadas en reportes oficiales nacionales y variaciones territoriales (31-35).
- **Módulo ambiental**, en el que la temperatura actúa como modulador indirecto de la supervivencia viral y de la probabilidad de exposición, respaldado por estudios de estabilidad del virus en distintos rangos térmicos (37).

5.2. Escenarios de temperatura y riesgo zoonótico en rabia canina

El modelo integra explícitamente variables ambientales relacionadas con el clima (*TemperaturaMedia* y *SupervivenciaViral*), lo que permite evaluar cómo distintos pisos térmicos modulan la probabilidad de transmisión de la rabia canina. Los resultados confirman que el clima actúa como un **modulador epidemiológico**, afectando la supervivencia del virus, el contacto efectivo y la fuerza de infección (FOI).

Dado que el virus de la rabia es **termolábil**, su supervivencia y estabilidad disminuyen rápidamente a medida que aumentan las temperaturas. De forma general:

- **Temperaturas frías** → mayor persistencia ambiental → mayor riesgo de transmisión.
- **Temperaturas cálidas** → menor persistencia ambiental → menor riesgo de transmisión.

Aunque la transmisión de la rabia canina no depende de un reservorio ambiental (requiere contacto directo mediante mordeduras, rasguños o lameduras), la estabilidad del virus en tejidos y saliva puede verse influida por la temperatura, lo que refuerza la pertinencia de incorporar esta variable en un marco ecológico y *One Health*.

5.2.1. Justificación de los rangos térmicos utilizados

El modelo incorpora la temperatura ambiental como modulador **indirecto** de la dinámica de transmisión del virus rábico en perros. La evidencia muestra que el virus de la rabia mantiene su infectividad por períodos más prolongados bajo temperaturas frías (aprox. 4–10 °C), mientras que la inactivación ocurre de manera acelerada cuando las temperaturas superan los 30 °C. Jackson y Wunner describen que el virus puede permanecer viable durante semanas a 4 °C, pero pierde infectividad en menos de 24 horas a 37 °C. Otros estudios experimentales confirman que la viabilidad viral disminuye de forma exponencial en tejidos orgánicos a medida que aumenta la temperatura (47,48).

Estas observaciones no buscan modelar una “transmisión ambiental” —que no aplica a la rabia canina—, sino **sustentar biológicamente** la inclusión de rangos térmicos como moduladores ecológicos plausibles.

Los valores térmicos utilizados en el modelo deben entenderse como **aproximaciones ecológicas**, no como parámetros biológicos estrictos. Su función principal es permitir evaluaciones de sensibilidad y explorar cómo escenarios ambientales plausibles pueden modular indirectamente la transmisibilidad o el contacto. Los efectos representados no se

interpretan como cambios fisiológicos del virus, sino como ajustes conductuales y ecológicos del hospedador, coherentes con marcos analíticos de *One Health* y epidemiología ambiental.

5.2.2. Escenario frío (baja temperatura → alta supervivencia viral)

Mayor riesgo epidemiológico

- La supervivencia viral relativa es más alta.
- Las partículas virales mantienen capacidad infectiva por más tiempo en tejidos y saliva.
- Aumenta el riesgo de transmisión peridomiciliaria en presencia de fallas en la vacunación.
- La presentación de casos es más probable con coberturas por debajo del 70 %.

Implicaciones para la política sanitaria

- Intensificar vacunación en zonas altoandinas (p. ej., Boyacá, Nariño, Cauca, Cundinamarca).
- Incrementar vigilancia pasiva y activa en corredores de fauna silvestre.
- Integrar alertas climáticas asociadas a periodos fríos prolongados.

5.2.3. Escenario templado (temperatura intermedia → supervivencia moderada)

Riesgo epidemiológico intermedio

- La supervivencia viral es moderada.
- El riesgo depende en mayor medida de la dinámica de contacto perro–perro y de la cobertura vacunal.

Implicaciones

- Mantener coberturas de vacunación canina ≥ 70 %.
- Escenario propicio para estrategias combinadas: vacunación, educación comunitaria y control poblacional canino.

5.2.4. Escenario cálido (alta temperatura → baja supervivencia viral)

Menor riesgo epidemiológico relativo

- La capacidad infectiva del virus se reduce.
- Disminuye la persistencia en heridas, superficies y ambiente.

Implicaciones

- Los territorios cálidos no deben descuidar la vacunación, pero la presión de transmisión ambiental relativa es menor.
- Es prioritario fortalecer la vigilancia en zonas donde coexisten perros y murciélagos hematófagos (Caribe, Amazonía, Orinoquía).

5.2.5. Escenarios epidemiológicos y climáticos simulados

Se simularon tres escenarios variando cobertura vacunal, temperatura media, supervivencia viral y β_{Animal} , lo que permitió analizar la **sensibilidad del sistema** y su **consistencia epidemiológica**.

Temperatura y supervivencia viral

La relación entre temperatura y estabilidad del virus está documentada en estudios experimentales:

- El virus rábico es más estable a bajas temperaturas (4–10 °C), permaneciendo viable durante semanas (47).
- A temperaturas moderadas (18–25 °C), la supervivencia disminuye pero no se anula por completo (47).
- A 30–37 °C, la inactivación es rápida, reduciendo la probabilidad de transmisión indirecta o por exposiciones repetidas a saliva contaminada (48).

Por ello se asignan valores de **supervivencia viral relativa** (1.0, 0.7, 0.3) como moduladores, no como medidas fisiológicas estrictas.

β_{Animal} (tasa de transmisión)

La β_{Animal} se modela como un parámetro ajustado a la interacción temperatura–comportamiento–cobertura vacunal, de forma cualitativamente coherente con la literatura:

- Mayor β en escenarios fríos y con baja inmunidad ($\approx 8 \times 10^{-7}$).
- β intermedia en zonas templadas ($\approx 3 \times 10^{-7}$).
- β reducida en condiciones cálidas y con alta inmunidad ($\approx 1 \times 10^{-7}$).

Estos valores no pretenden ser estimaciones empíricas exactas, sino **coeficientes calibrables**, consistentes con estudios sobre transmisión perro–perro bajo distintos contextos epidemiológicos (37,38,47).

En conjunto, el modelo ofrece:

- Capacidad para simular dinámicas multicomponente (animal, ambiental, humano).
- Uso de parámetros sustentados en literatura científica y datos colombianos.
- Evaluación de escenarios críticos, moderados y optimistas.
- Flexibilidad para ampliarse a modelos territoriales o multiespecie.
- Utilidad como herramienta para diseñar políticas públicas basadas en evidencia.

La evaluación preliminar muestra que el modelo SEIVD es **pertinente y epidemiológicamente coherente** para estudiar la dinámica de la rabia canina en Colombia, y que los tres escenarios simulados permiten identificar umbrales críticos y orientar decisiones sanitarias en el marco de Una Sola Salud.

5.3. Discusión sobre el sesgo territorial

El uso de parámetros promedio introduce un **sesgo territorial inevitable** debido a la heterogeneidad epidemiológica, demográfica y climática de Colombia. Entre los principales elementos se encuentran:

1. **Variabilidad en la densidad poblacional canina**, con diferencias marcadas entre zonas rurales dispersas y centros urbanos (41).
2. **Coberturas de vacunación desiguales**, influenciadas por la disponibilidad de recursos locales, accesibilidad y capacidad institucional (36,41).
3. **Subregistro diferencial**, especialmente en áreas rurales donde la vigilancia es limitada y las notificaciones son esporádicas (44,50).
4. **Movilidad animal heterogénea**, mayor en zonas fronterizas y corredores económicos (50).
5. **Heterogeneidad climática**, que modula el comportamiento y la interacción de los perros (29).

Por tanto, el modelo debe interpretarse como un **marco general de análisis**, no como la descripción exacta de un territorio específico. La reducción de este sesgo requerirá calibraciones específicas por departamento o municipio y la incorporación de datos más densos en espacio y tiempo.

5.4. Desarrollo del objetivo general aplicando sistemas dinámicos

El modelo SEIVD de rabia canina desarrollado en Vensim® permitió operacionalizar el objetivo general de analizar el impacto del cambio climático en la aparición, transmisión y distribución de enfermedades zoonóticas en Colombia, integrando un enfoque de Una Sola Salud (*One Health*) y el uso de modelos dinámicos para evaluar escenarios ambientales y epidemiológicos (4).

En primer lugar, el submodelo ambiental incorpora la temperatura media y la supervivencia viral como variables clave que modulan la fuerza de infección, de modo que escenarios más fríos o más cálidos representan condiciones climáticas actuales y proyectadas asociadas al cambio climático.

En segundo lugar, el submodelo animal describe la dinámica de la rabia mediante compartimentos de susceptibles, expuestos, infectados, vacunados y fallecidos, lo que permite cuantificar la aparición de casos nuevos, la incidencia acumulada y las tasas de incidencia en el tiempo, bajo diferentes combinaciones de clima y cobertura vacunal nacional o territorial. Así, los escenarios crítico, moderado y optimista no solo ilustran la sensibilidad de la transmisión frente a cambios en la temperatura y la vacunación, sino que constituyen escenarios de riesgo asociables a territorios o contextos específicos.

De manera complementaria, el submodelo humano permite estimar el riesgo de exposición y la ocurrencia de casos en personas a partir de la dinámica infecciosa en la población canina. Este módulo incluye los compartimentos de susceptibles, expuestos, infectados y fallecidos, incorporando procesos como la profilaxis posexposición (PEP), la probabilidad de progresión clínica y la letalidad del 100 % en ausencia de intervención oportuna. Su propósito no es modelar transmisión humano–humano, sino cuantificar el impacto sanitario derivado de los cambios en la transmisión animal. De esta manera, el submodelo humano funciona como un indicador centinela que traduce variaciones en la fuerza de infección canina en riesgo poblacional, permitiendo identificar territorios con mayor vulnerabilidad, brechas en acceso a PEP y necesidades de fortalecimiento de la vigilancia epidemiológica.

Finalmente, los resultados obtenidos permiten derivar estrategias de promoción de la salud, vigilancia de la salud pública, prevención de riesgos, control de factores de riesgo, y fortalecimiento de los factores protectores, basados en evidencia, entre ellas la necesidad de mantener coberturas de vacunación canina superiores al 80%, priorizar áreas con condiciones climáticas más favorables a la supervivencia del virus y fortalecer la articulación entre vigilancia epidemiológica y monitoreo climático bajo el enfoque de Una Sola Salud.

Como parte del proceso de **retroalimentación y validación**, ya se mencionó el desarrollo de un espacio de trabajo con profesionales expertos de la autoridad sanitaria nacional (Ministerio de Salud y Protección Social), en el cual se discutieron la pertinencia, alcances y limitaciones del modelo, así como las oportunidades de uso en la planeación de acciones de prevención y control de zoonosis. Las principales observaciones y sugerencias se recogen en el acta correspondiente (Anexo F).

6. Discusión

6.1. Interpretación integral del modelo SEIVD y su aporte metodológico

El presente trabajo no pretendió generar predicciones epidemiológicas definitivas sobre la rabia canina en Colombia, sino demostrar la viabilidad y pertinencia de integrar **sistemas dinámicos no lineales** como Vensim® en el análisis de zoonosis bajo escenarios de cambio climático. Los resultados obtenidos deben interpretarse como **ejercicios de simulación exploratoria** que permiten comprender patrones generales de transmisión, identificar umbrales críticos de intervención y evaluar la sensibilidad del sistema ante variaciones en parámetros climáticos, demográficos y de cobertura vacunal.

Los resultados del presente trabajo se abordaron de manera integral y no de forma particular, dado que el aporte central no radica en obtener predicciones cerradas, sino en evidenciar la interacción entre componentes epidemiológicos, ambientales y de intervención. Este enfoque permitió identificar retroalimentaciones críticas dentro del sistema y demostrar la utilidad del análisis sistémico para comprender la dinámica interna del fenómeno de transmisión de la rabia canina.

La modelización mediante sistemas dinámicos presenta ventajas significativas frente a los métodos epidemiológicos tradicionales, particularmente en contextos de alta complejidad e incertidumbre. Un ejemplo ilustrativo en el contexto colombiano es la diferencia entre el uso del **canal endémico** para rabia y el **modelo dinámico SEIVD** desarrollado en este estudio:

Canal endémico (método tradicional): Calcula umbrales estadísticos (percentiles) basados en series históricas de casos notificados, clasifica periodos epidemiológicos como "seguridad", "alarma" o "epidemia", es útil para vigilancia retrospectiva pero no puede (anticipar efectos de variaciones climáticas futuras, evaluar impacto de coberturas vacunales antes de implementarlas, modelar interacciones entre temperatura, supervivencia viral y contacto animal, simular escenarios "*qué pasaría si*" (p. ej., reducción presupuestal en vacunación).

Modelo dinámico SEIVD (este estudio): representa explícitamente procesos biológicos (incubación, transmisión, inmunización), integra **retroalimentaciones** (cobertura vacunal ↓ → susceptibles ↑ → fuerza de infección ↑ → casos ↑), incorpora **efectos retardados** (temperatura baja actual → mayor supervivencia viral → aumento de casos semanas después), permite **exploración paramétrica** (simular departamentos fríos vs. cálidos, coberturas 30% vs. 80%), captura **no linealidades** (efecto umbral donde coberturas <70% permiten circulación sostenida, mientras ≥80% interrumpen transmisión).

En 2015, Colombia reportó un caso de rabia humana transmitida por gato en Cundinamarca (Mesitas del Colegio), zona rural montañosa con temperaturas promedio de 18°C. El canal endémico habría clasificado el evento como "alarma" basándose en la tendencia histórica departamental. Sin embargo, un modelo dinámico habría permitido:

1. Anticipar el riesgo vinculando bajas temperaturas locales con mayor supervivencia viral y contacto peridomiciliario humano-gato en zonas de frontera agrícola
2. Simular el impacto de aumentar cobertura vacunal canina/felina del 45% (reportada) al 80% en municipios vecinos
3. Cuantificar tiempo crítico de respuesta post-detección del caso índice para prevenir transmisión secundaria

Este ejemplo ilustra cómo los sistemas dinámicos **capturan retroalimentaciones, efectos retardados y no linealidades** que caracterizan la transmisión de enfermedades zoonóticas en sistemas socio ecológicos cambiantes (19,51). Esta capacidad de representar **bucles causales** entre variables epidemiológicas, ambientales y de intervención permite explorar escenarios "*qué pasaría si*", fundamentales para la planificación anticipatoria en salud pública (36).

6.2. Coherencia con la evidencia científica previa

Los tres escenarios simulados (crítico, moderado y optimista) reflejan patrones epidemiológicos consistentes con la literatura internacional sobre rabia canina. La relación

inversa entre cobertura vacunal y casos acumulados ha sido documentada ampliamente: estudios en África y Asia han demostrado que coberturas sostenidas **superiores al 70%** reducen drásticamente la incidencia de rabia humana transmitida por perros, mientras que coberturas inferiores al 50% permiten la persistencia endémica de la enfermedad (37,52). En el contexto latinoamericano, la experiencia de países como Brasil, Perú y México confirma que **la vacunación masiva continua** constituye la intervención más costo-efectiva para el control de la rabia urbana (35,53).

La incorporación del **componente ambiental** (temperatura y supervivencia viral) representa una innovación metodológica relevante. Aunque la evidencia experimental sobre la termolabilidad del virus rábico es conocida (4), su integración explícita en modelos epidemiológicos dinámicos ha sido limitada. Nuestros hallazgos preliminares sugieren que **variaciones de 10-15°C en temperatura media** pueden modificar sustancialmente la persistencia viral ambiental y, consecuentemente, la probabilidad de transmisión. Esto es particularmente relevante para Colombia, donde la heterogeneidad altitudinal y climática genera nichos ecológicos diferenciados que requieren estrategias de vigilancia y control territorialmente adaptadas (54).

6.3. Formulación de recomendaciones bajo enfoque One Health

Los hallazgos sustentan cinco recomendaciones estratégicas:

- Coberturas vacunales $\geq 80\%$ con priorización en zonas de vulnerabilidad climática (altoandinas, interfaz urbano-rural).
- Vigilancia diferenciada integrando señales climáticas con indicadores epidemiológicos para alertas tempranas.
- Articulación intersectorial operativa entre INS, ICA, IDEAM y autoridades territoriales.
- Acceso garantizado a PEP en zonas rurales y periurbanas.
- Capacitación técnica en modelado dinámico para profesionales de entidades territoriales.

Estas recomendaciones, fundamentadas en la exploración sistemática mediante Vensim®, contribuyen a la transición hacia gobernanza anticipatoria, posicionando el modelado dinámico como instrumento estratégico para la toma de decisiones en salud pública bajo incertidumbre climática.

7. Conclusiones

7.1. Principales hallazgos y contribuciones

Este trabajo demostró la **viabilidad técnica y relevancia estratégica** de utilizar sistemas dinámicos (Vensim®) para modelar la transmisión de rabia canina bajo escenarios de cambio climático en Colombia, integrando el enfoque *One Health*. Las contribuciones principales incluyen:

a) Identificación y parametrización de factores determinantes: Se identificaron y parametrizaron exitosamente factores climáticos (temperatura media, supervivencia viral), ecológicos (contacto perro-perro, densidad poblacional) y sociales (cobertura vacunal, acceso a servicios) que modulan la transmisión bajo escenarios de cambio climático. El modelo demostró que variaciones de 15-20°C alteran sustancialmente la supervivencia viral y la dinámica de transmisión, superando enfoques epidemiológicos tradicionales al incorporar el clima explícitamente en la estructura causal del sistema.

b) Recolección y estructuración de datos multidimensionales: Se consolidó una base intersectorial robusta integrando datos del INS (SIVIGILA), estimaciones demográficas del MSPS (6.289.122 caninos), proyecciones del IDEAM y literatura científica validada. Esta integración alimentó coherentemente los tres submodelos, aunque persistió como limitación la heterogeneidad temporal-espacial de los registros y el subregistro en zonas rurales, evidenciando la necesidad de fortalecer la vigilancia epidemiológica nacional.

c) Construcción del modelo SEIVD multicomponente: Se desarrolló exitosamente un modelo de dinámica de sistemas tipo SEIVD ampliado, estructurado en tres módulos interdependientes que capturan las interacciones críticas del sistema:

- **Submodelo animal:** Representa la dinámica epidemiológica central mediante compartimentos de Susceptibles, Expuestos, Infectados, Vacunados y Muertos, incorporando transiciones basadas en tasas de transmisión (β), progresión clínica (σ), letalidad (γ), inmunización (ν) y pérdida de inmunidad (ω).

- **Submodelo ambiental:** Modula la transmisión mediante variables climáticas, estableciendo relaciones funcionales entre temperatura, supervivencia viral y probabilidad de contacto efectivo, operacionalizando el efecto indirecto del cambio climático sobre la ecología de la enfermedad.
- **Submodelo humano:** Actúa como componente centinela que traduce la dinámica infecciosa animal en riesgo poblacional, integrando exposición por mordedura, profilaxis posexposición (PEP) y progresión clínica fatal en ausencia de tratamiento.

Esta arquitectura modular permite explorar escenarios contrafactuales y evaluar intervenciones específicas bajo distintas condiciones climáticas, representando una contribución metodológica sustantiva al modelado *One Health*.

d) Simulación de escenarios y evaluación de políticas: Tres escenarios epidemiológico-climáticos cuantificaron el comportamiento sistémico:

- **Crítico** (30% cobertura, 15°C): Persistencia endémica con amplificación sostenida.
- **Moderado** (60% cobertura, 22°C): Reducción parcial sin interrupción completa.
- **Optimista** (80% cobertura, 30°C): Control efectivo de transmisión.

Los resultados validaron el umbral crítico $\geq 70-80\%$ de cobertura vacunal establecido internacionalmente, proporcionando evidencia cuantitativa para priorización territorial y diseño de estrategias adaptativas.

7.2. Relevancia del modelo para la gestión de zoonosis

El modelo desarrollado constituye una **herramienta de gobernanza anticipatoria** que trasciende la función predictiva, actuando como:

- **Laboratorio virtual** para explorar escenarios hipotéticos (cambios de política, fenómenos climáticos extremos, brotes localizados) sin experimentación en poblaciones reales.

- **Plataforma de diálogo intersectorial**, facilitando la comunicación entre salud humana, sanidad animal, ambiente y planificación territorial.
- **Instrumento pedagógico** para capacitación de profesionales en pensamiento sistémico y análisis de complejidad.

Su aplicabilidad inmediata incluye:

- Priorización de territorios para intensificación de campañas vacunales.
- Diseño de sistemas de alerta temprana que integren señales climáticas.
- Evaluación *ex-ante* de políticas públicas (ej. impacto de reducción presupuestal en vacunación).
- Comunicación de riesgos a tomadores de decisión y comunidades.

7.3. Integración con estrategias *One Health*

Los resultados refuerzan la necesidad de **superar la fragmentación sectorial** en la gestión de zoonosis. La rabia no es solo un problema veterinario ni exclusivamente de salud humana, sino una **manifestación de desequilibrios socioecológicos** que requieren respuestas coordinadas. El modelo evidencia cómo intervenciones en salud animal (vacunación canina) generan **externalidades positivas directas** sobre salud humana, justificando inversiones intersectoriales.

El enfoque *One Health*, operacionalizado mediante modelado dinámico, permite:

- Identificar **sinergias entre intervenciones** (vacunación + control poblacional + educación).
- Cuantificar **co-beneficios** (reducción simultánea de rabia, control de otras zoonosis, mejora de bienestar animal).
- Diseñar **políticas integradas** que optimicen recursos limitados.

7.4. Escalabilidad y aplicabilidad

El marco metodológico desarrollado es **escalable y transferible**:

A otras zoonosis: La estructura modular permite adaptación a leptospirosis (incorporando ciclos hidrológicos), brucelosis (integrando dinámicas de producción ganadera), o leishmaniasis (modelando vectores flebótomos).

A diferentes territorios: Desde análisis subnacionales hasta estudios comparativos regionales o fronterizos.

A escalas temporales variables: Desde simulaciones de brotes agudos (días-semanas) hasta proyecciones de mediano plazo (5-10 años) bajo escenarios climáticos RCP.

7.5. Valor agregado para la salud pública colombiana

Este trabajo responde a brechas identificadas en el **Plan Decenal de Salud Pública 2022-2031** y la **Política Nacional de Cambio Climático**, que demandan:

- Herramientas prospectivas para gestión del riesgo en salud.
- Integración de determinantes ambientales en vigilancia epidemiológica.
- Fortalecimiento de capacidades analíticas en entidades territoriales.

La adopción de sistemas dinámicos por parte del INS, secretarías departamentales y organismos de cooperación internacional puede **catalizar la transición hacia vigilancia inteligente**, complementando sistemas tradicionales (SIVIGILA, canal endémico) con capacidades de simulación y evaluación contrafactual.

8. LIMITACIONES Y PROSPECTIVA

8.1. Limitaciones del estudio

8.1.1. Limitaciones de datos

Complejidad histórica: Períodos con subregistro afectan la comparabilidad temporal. La vigilancia pasiva (notificación dependiente del reporte voluntario por parte de los servicios de salud, sin búsqueda activa de casos) subestima la carga real de enfermedad, especialmente en zonas rurales dispersas.

Integración de fuentes: La articulación de sistemas de información de salud humana (SIVIGILA), sanidad animal (ICA) y clima (IDEAM) enfrenta **incompatibilidades de formato, periodicidad y cobertura geográfica**. La construcción de repositorios unificados requiere inversión institucional sostenida.

8.1.2. Limitaciones metodológicas

Supuestos estructurales: El modelo asume poblaciones homogéneas de acuerdo con la limitación de datos con los que se alimenta. Modelos basados en agentes o redes complejas capturarían mejor la heterogeneidad de la población, con mayor complejidad y diversificación de **redes de contacto estructuradas** (vecindarios, parques urbanos, zonas rurales específicas).

8.1.3. Limitaciones de alcance

Enfoque en ciclo urbano: El modelo se concentró en rabia transmitida por perros, sin representar explícitamente el **ciclo silvestre** (murciélagos hematófagos, fauna silvestre). La interacción entre ambos ciclos, especialmente en zonas de frontera agrícola, requiere extensiones del modelo.

Dimensión sociocultural: Factores como tenencia responsable, creencias sobre vacunación, miedo a mordeduras, o prácticas de manejo animal no fueron incorporados formalmente.

8.2. Retos en la validación y transferencia institucional

La implementación operativa de modelos dinámicos en salud pública enfrenta barreras organizacionales y técnicas:

Capacidad técnica limitada: Pocos profesionales en entidades territoriales poseen formación en modelado dinámico o programación. **Programas de capacitación** (cursos, diplomados, comunidades de práctica) son necesarios para sostenibilidad.

Fragmentación institucional: La coordinación entre salud humana, sanidad animal y ambiente permanece débil en muchos territorios. El modelo requiere **acuerdos interinstitucionales** para flujo continuo de datos y acción coordinada.

Recursos computacionales: Aunque Vensim® PLE es gratuito, el análisis de grandes volúmenes de datos, simulaciones estocásticas o modelos espaciales demanda **infraestructura tecnológica** (servidores, software especializado) no siempre disponible.

Resistencia al cambio: La adopción de nuevas herramientas enfrenta inercias organizacionales. Experiencias exitosas muestran que el **liderazgo institucional**, la demostración de valor agregado mediante casos piloto y la participación de usuarios finales en diseño del modelo son críticos.

9. Referencias Bibliográficas

1. (IPCC) IP on CC. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability [Internet]. Intergovernmental Panel on Climate Change; 2022. Disponible en: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>
2. Herrera S García L SJ. Climate variability and vector-borne diseases in Colombia. *Biomédica*. 2024;44(2):e7897.
3. (IDEAM) I de HM y EA. Escenarios de Cambio Climático en Colombia [Internet]. Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales; 2023. Disponible en: <https://www.ideam.gov.co/>
4. Organización Panamericana de la Salud. Cambio climático y salud en América Latina [Internet]. Organización Panamericana de la Salud; 2023. Disponible en: <https://www.paho.org/es>
5. M GT. Zoonotic emergence of coronavirus: a potential public health risk for Latin America. *Rev. MVZ Córdoba* [Internet]. 1 de septiembre de 2018 [citado 1 de noviembre de 2025];23(3):6775-7. Disponible en: <https://doi.org/10.21897/rmvz.1408>
6. Organización Mundial de Sanidad Animal. Una sola salud - OMSA - Organización Mundial de Sanidad Animal [Internet]. 2020 [citado 28 de octubre de 2025]. Disponible en: <https://www.woah.org/es/que-hacemos/iniciativas-mundiales/una-sola-salud/>
7. Mackenzie JS JM. The One Health approach: why is it so important? *Trop Med Infect Dis*. 2019;4(2).
8. Destoumieux-Garzon D Boetsch G Boissier J Darriet F Duboz P MP. The One Health concept: 10 years old and a long road ahead. *Front Vet Sci*. Febrero de 2018; 5:14.
9. Amuasi J WC. Calling for a COVID-19 One Health Research Coalition. *The Lancet*. 2020;395:1543-4.

10. Cuartas D MF. Cambio climático y salud: retos para Colombia. Revista Universidad Industrial de Santander [Internet]. 18 de agosto de 2016 [citado 1 de noviembre de 2025];48(4):428-35. Disponible en: <https://doi.org/10.18273/revsal.v48n4-2016001>
11. Banco Mundial. Banco mundial web. 2024 [citado 2 de noviembre de 2025]. Colombia y la respuesta en salud ante el cambio climático. Disponible en: <https://www.bancomundial.org/es/country/colombia/publication/colombia-y-la-respuesta-en-salud-ante-el-cambio-climatico>
12. Acero-Aguilar M. Zoonosis y otros problemas de salud pública relacionados con los animales: reflexiones a propósito de sus aproximaciones teóricas y metodológicas. Rev Gerenc Polít Salud. 2017;15 (31):232-45.
13. Organization WH. One Health Joint Plan of Action 2022–2026 [Internet]. World Health Organization; 2022. Disponible en: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240063079>
14. Grace D Ochungo P Jones KE MF. Mapping of poverty and likely zoonoses hotspots [Internet]. International Livestock Research Institute [Internet]. Enero de 2012; Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/292768141>
15. Heesterbeek H Andreasen V Bansal S De Angelis D Dye C ARM. Modeling infectious disease dynamics in the complex landscape of global health. Science (1979). 13 de marzo de 2015;347(6227):aaa4339.
16. Bedford J Ihekweazu C Kang G Koopmans M Nkengasong J FJ. A new twenty-first century science for effective epidemic response. Nature [Internet]. 24 de septiembre de 2019 [citado 1 de noviembre de 2025];575(7781):130-6. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1717-y>
17. Carlson CJ Merow C Trisos CH Zipfel CM Eskew EA AGF. Climate change increases cross-species viral transmission risk. Nature [Internet]. 21 de abril de 2022 [citado 1 de noviembre de 2025];607(7919):555-62. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04788-w>

18. Rocklov J DR. Climate change: an enduring challenge for vector-borne disease prevention and control. *Nat Immunol* [Internet]. 20 de abril de 2020 [citado 1 de noviembre de 2025];21(5):479-83. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41590-020-0648-y>
19. Homer JB, Hirsch GB. System Dynamics Modeling for Public Health: Background and Opportunities. *Am J Public Health* [Internet]. marzo de 2006 [citado 2 de noviembre de 2025];96(3):452-8. Disponible en: <https://doi.org/10.2105/AJPH.2005.062059>
20. Paltiel AD, Schwartz JL. Assessing COVID-19 Prevention Strategies to Permit the Safe Opening of Residential Colleges in Fall 2021. *Ann Intern Med* [Internet]. 31 de noviembre de 2021;174(11):1563-71. Disponible en: <https://www.acpjournals.org/doi/10.7326/M21-2965>
21. Arino J van den DP. A multi-city epidemic model. *Math Popul Stud* [Internet]. 26 de octubre de 2010 [citado 1 de noviembre de 2025];10(3):175-93. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/08898480306720>
22. Ryan SJ Mordecai EA Johnson LR CCJ. Global expansion and redistribution of Aedes-borne virus transmission risk with climate change. *PLoS Negl Trop Dis* [Internet]. 28 de marzo de 2019 [citado 1 de noviembre de 2025];13(10):e0007213. Disponible en: <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0007213>
23. López L Morales A Velasco C RJ. Integrating vaccination and mortality in compartmental models: SEIVD approach for zoonotic diseases. *J Theor Biol*. 2022; 548:111215.
24. Laniak GF, Olchin G, Goodall J, Voinov A, Hill M, Glynn P, et al. Integrated environmental modeling: A vision and roadmap for the future. *Environmental Modelling & Software* [Internet]. 1 de enero de 2013 [citado 1 de noviembre de 2025];39:3-23. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364815212002381?via%3Dihub>

25. Gibb R Chin KQ Donnelly CA Blackburn TM Newbold T RDW. Zoonotic host diversity increases in human-dominated ecosystems. *Nature*. 2020;584(7821):398-402.
26. Grimm V RSF. Individual-based modeling and ecology [Internet]. Princeton University Press; 2005 [citado 1 de noviembre de 2025]. Disponible en: <https://doi.org/10.2307/j.ctt5hhnk>
27. Hikal MMA ESNAE. Stability of a general SEIV epidemic model with time delay and nonlinear incidence rate. *Applied Mathematical Sciences*. Octubre de 2013;7(58):2879-91.
28. Watkins NJ Pappas GJ NC. Robust economic model predictive control of SEIV epidemics over networks. *Eur J Control*. 2019; 47:24-
29. (INS) IN de S. Informes del evento Rabia 2004–2024 [Internet]. Instituto Nacional de Salud, República de Colombia; 2024. Disponible en: <https://www.ins.gov.co/buscador-eventos/Paginas/Info-Evento.aspx>
30. I MYM. The use of system dynamics methodology in building a COVID-19 confirmed case model. *Comput Math Methods Med*. 7 de noviembre de 2020;
31. (MSPS) M de S y PS. Coberturas de vacunación antirrábica para perros y gatos por departamento, Colombia, 2021. Bogotá, Colombia: Ministerio de Salud y Protección Social; 2021.
32. (MSPS) M de S y PS. Coberturas de vacunación antirrábica para perros y gatos por departamento, Colombia, 2020. Bogotá, Colombia: Ministerio de Salud y Protección Social; 2020.
33. (MSPS) M de S y PS. Coberturas de vacunación antirrábica para perros y gatos por departamento, Colombia, 2022. Bogotá, Colombia: Ministerio de Salud y Protección Social; 2022.
34. (MSPS) M de S y PS. Coberturas de vacunación antirrábica para perros y gatos por departamento, Colombia, 2023. Bogotá, Colombia: Ministerio de Salud y Protección Social; 2023.

35. (MSPS) M de S y PS. Coberturas de vacunación antirrábica para perros y gatos por departamento, Colombia, 2024. Bogotá, Colombia: Ministerio de Salud y Protección Social; 2024.
36. Zinsstag J, Dürr S, Penny MA, Mindekem R, Roth F, Menendez Gonzalez S, et al. Transmission dynamics and economics of rabies control in dogs and humans in an African city. *Proc Natl Acad Sci U S A* [Internet]. 1 de septiembre de 2009 [citado 18 de noviembre de 2025];106(35):14996-5001. Disponible en: <https://www.pnas.org/doi/pdf/10.1073/pnas.0904740106>
37. Hampson K, Coudeville L, Lembo T, Sambo M, Kieffer A, Attlan M, et al. Estimating the Global Burden of Endemic Canine Rabies. *PLoS Negl Trop Dis* [Internet]. 16 de abril de 2015 [citado 26 de noviembre de 2025];9(4):e0003709. Disponible en: <https://journals.plos.org/plosntds/article?id=10.1371/journal.pntd.0003709>
38. (WHO) WHO. Rabies vaccines: WHO position paper – April 2018 [Internet]. [citado 28 de noviembre de 2025]. Disponible en: <https://www.who.int/publications/i/item/who-wer9316>
39. Fooks AR., Jackson AC. Rabies: scientific basis of the disease and its management. 2020;
40. (OPS) OP de la S. Es posible llegar a 2030 con la eliminación de la rabia humana transmitida por perros en las Américas - OPS/OMS | Organización Panamericana de la Salud [Internet]. [citado 11 de diciembre de 2025]. Disponible en: <https://www.paho.org/es/historias/es-posible-llegar-2030-con-eliminacion-rabia-humana-transmitida-por-perros-americas>
41. Undurraga EA, Blanton JD, Thumbi SM, Mwatondo A, Muturi M, Wallace RM. Tool for Eliminating Dog-Mediated Human Rabies through Mass Dog Vaccination Campaigns. *Emerg Infect Dis* [Internet]. 1 de diciembre de 2017 [citado 18 de noviembre de 2025];23(12):2114-6. Disponible en: <https://openurl.ebsco.com/contentitem/doi:10.3201/eid2312.171148?sid=ebsco:plink:crawler&id=ebsco:doi:10.3201/eid2312.171148&crl=c>

42. Taylor LH, Wallace RM, Balaram D, Lindenmayer JM, Eckery DC, Mutoonono-Watkiss B, et al. The Role of Dog Population Management in Rabies Elimination- A Review of Current Approaches and Future Opportunities. *Front Vet Sci* [Internet]. 10 de julio de 2017 [citado 11 de diciembre de 2025];4(JUL). Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28740850/>
43. Salud IN de. Protocolo de Vigilancia en Salud Pública de Vigilancia Integrada de la Rabia [Internet] [Internet]. Instituto Nacional de Salud; 2022 mar. Disponible en: <https://www.ins.gov.co/buscador-eventos/SitePages/Evento.aspx?Event=41>
44. (WHO) WHO. Rabies [Internet]. [citado 26 de noviembre de 2025]. Disponible en: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/rabies>
45. Organización Mundial de la Salud. WEB PAGE. 2023 [citado 2 de noviembre de 2025]. Rabia - OPS/OMS | Organización Panamericana de la Salud. Disponible en: <https://www.paho.org/es/temas/rabia>
46. Wallace RM, Undurraga EA, Blanton JD, Cleaton J, Franka R. Supplementary Material Elimination of Dog-Mediated Human Rabies Deaths by 2030: Needs Assessment and Alternatives for Progress.
47. Fekadu M, Fekadu M. Pathogenesis of rabies virus infection in dogs. *Rev Infect Dis* [Internet]. 1988 [citado 11 de diciembre de 2025];10 Suppl 4:S678-83. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/3206080/>
48. Singh R, Singh KP, Cherian S, Saminathan M, Kapoor S, Reddy GBM, et al. Rabies – Epidemiology, pathogenesis, public health concerns and advances in diagnosis and control: A comprehensive review. Vol. 37, *Veterinary Quarterly*. Taylor and Francis Ltd.; 2017. p. 212-51.
49. Giesen A, Gniel D, Malerczyk C. 30 Years of rabies vaccination with Rabipur: a summary of clinical data and global experience. *Expert Rev Vaccines* [Internet]. 1 de marzo de 2015 [citado 12 de diciembre de 2025];14(3):351-67. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25683583/>

50. Gompper ME. Free-Ranging Dogs and Wildlife Conservation. Free-Ranging Dogs and Wildlife Conservation [Internet]. 17 de octubre de 2013 [citado 11 de diciembre de 2025];1-336. Disponible en: <https://academic.oup.com/book/8435>
51. Sterman JD. Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World. Irwin/McGraw-Hill; 2000.
52. Vigilato MAN, Clavijo A, Knobl T, Silva HMT, Cosivi O, Schneider MC, et al. Progress towards eliminating canine rabies: Policies and perspectives from Latin America and the Caribbean. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences [Internet]. Agosto de 2013 [citado 26 de noviembre de 2025];368(1623). Disponible en: /doi/pdf/10.1098/rstb.2012.0143
53. Wera E, Velthuis AGJ, Geong M, Hogeveen H. Costs of rabies control: An economic calculation method applied to Flores Island. PLoS One. 27 de diciembre de 2013;8(12).
54. Escobar LE, Craft ME. Advances and limitations of disease biogeography using ecological niche modeling. Vol. 7, Frontiers in Microbiology. Frontiers Media S.A.; 2016.
55. Cediell Becerra N Villamil Jiménez L Romero J Diaz A D la HF. Epidemiología de la rabia canina en Colombia. Revista de Salud Pública [Internet]. 10 de junio de 2010;12:368-79. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/317730510 Epidemiologia de la rabia canina en Colombia](https://www.researchgate.net/publication/317730510_Epidemiologia_de_la_rabia_canina_en_Colombia)
56. CDC. Rabies | Rabies | CDC [Internet]. [citado 28 de noviembre de 2025]. Disponible en: <https://www.cdc.gov/rabies/index.html>

10. ANEXOS

Anexo A. Situación epidemiológica de la rabia canina y humana en Colombia

Dadas las características geográficas del país, en Colombia se presentan dos ciclos de transmisión de esta enfermedad: a) Ciclo urbano, donde los perros domésticos y los zorros cangrejeros (*Cerdocyon thous*) mantienen y transmiten la enfermedad al ser humano; y b) Ciclo silvestre, que se mantiene y transmite a partir de los murciélagos hematófagos o vampiros como reservorios. En este último, los animales de producción son los más afectados (principalmente bovinos) y los gatos por sus hábitos de caza se involucran como reservorios transmisores de la enfermedad al humano.

En Colombia, la rabia es considerada una prioridad en salud pública; persisten focos de rabia urbana (transmitida por perros y gatos) y rabia silvestre (principalmente por murciélagos hematófagos en zonas rurales), lo que representa un desafío epidemiológico continuo (67).

El Instituto Nacional de Salud de Colombia, autoridad nacional en vigilancia de la salud pública, ha notificado la presentación de 43 casos en humanos para el periodo de tiempo comprendido entre los años 1999 a 2021; de los cuales 8 fueron por transmisión de perros, 12 por gato, 22 por murciélago y en un caso no se pudo identificar la especie transmisora.

Los reportes se dieron en los departamentos y ciudades de Putumayo, Boyacá, Cundinamarca, Casanare, Cauca, Chocó, Santander, Tolima, Valle del Cauca, Santa Marta y Huila. No se reportaron casos en humanos en los años 2022, 2023 y 2024. (29).

La incidencia de la rabia humana se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 6. Casos de Rabia humana en Colombia periodo 1999 – 2024.

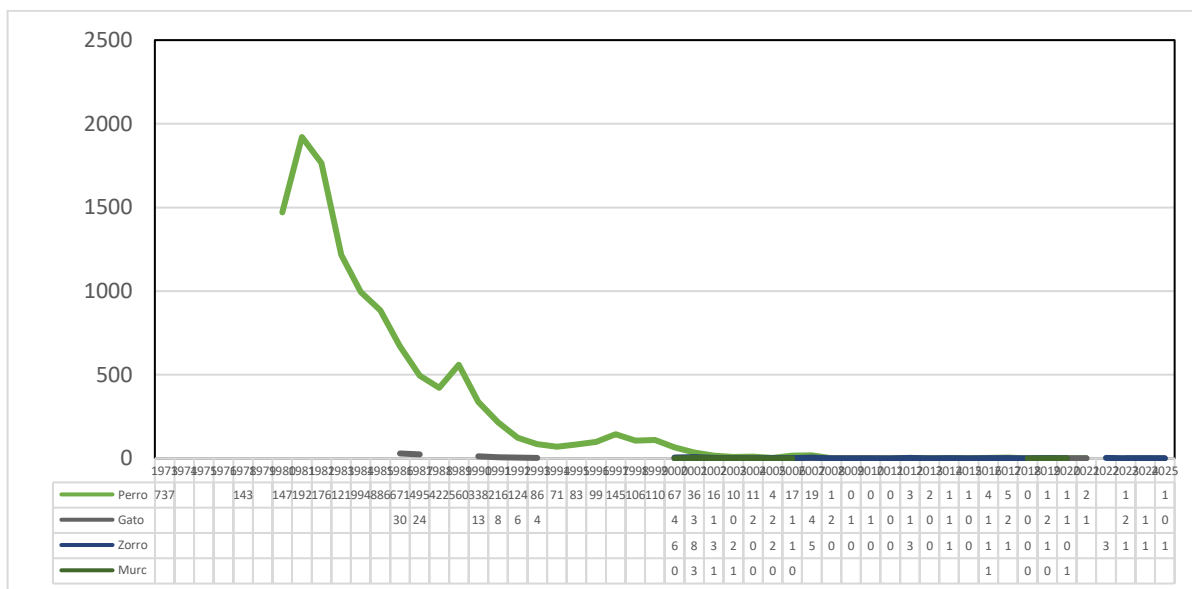
Año	Número de casos	Departamento/Distrito (Municipio)	Animal Agresor	Variante Viral
1999	1	Putumayo (Orito)	Perro	V1 (Perro)
	2	Magdalena (Pedraza – Ciénaga)		
2000	1	Putumayo (Orito)	Perro	V1 (Perro)
2003	1	Cundinamarca (Quipile)	Gato	V8 (Zorrillo)
2004	14	Chocó (Pizarro)	Murciélago	V3 (Murciélago)

Impacto del cambio climático en la dinámica de zoonosis en Colombia:
un modelo de sistemas en Vensim bajo el enfoque One Health

2005	3	Chocó (Bajo Baudó)	Murciélago	V3 (Murciélago)
2006	2	Santa Marta	Perro	V1 (Perro)
2007	2	Santa Marta	Perro	V1 (Perro)
	1	Casanare (San Luis de Palenque)	Murciélago	V3 (Murciélago)
2008	2	Cauca (Santander de Quilichao)	Gato	V3 (Murciélago)
	1	Santander (Floridablanca)	Murciélago	V3 (Murciélago)
	1	Cauca (Bolívar)	Gato	Murciélago
2009	1	Boyacá (Moniquirá)	Gato	V4 (Murciélago insectívoro)
	1	Santander (Barrancabermeja)	Murciélago	V3 (Murciélago)
2010	1	Tolima (San Luis)	Gato	Var. inespecífica (Murciélago)
	1	Santander (Piedecuesta)	Murciélago	V3 (Vampiro)
	1	Santander (Enciso)	Gato	V3 (Vampiro)
2012	2	Valle del Cauca (Roldanillo)	Gato	V4 (Murciélago insectívoro)
2015	1	Cundinamarca (Mesitas del Colegio)	Gato	Linaje Genético murciélago hematófago
2016	1	Cundinamarca (Girardot)	Gato	Linaje Genético murciélago hematófago
2017	1	Cundinamarca (Tena)	Gato	Linaje Genético murciélago hematófago
2020	1	Neiva (Huila)	Gato	Linaje Genético murciélago hematófago
2021	1	La Argentina (Huila)	Gato	Linaje Genético murciélago hematófago
2022	0	NA	NA	NA
2023	0	NA	NA	NA
2024	0	NA	NA	NA

Fuente: Tomado de MSPS – INS - SIVIGILA

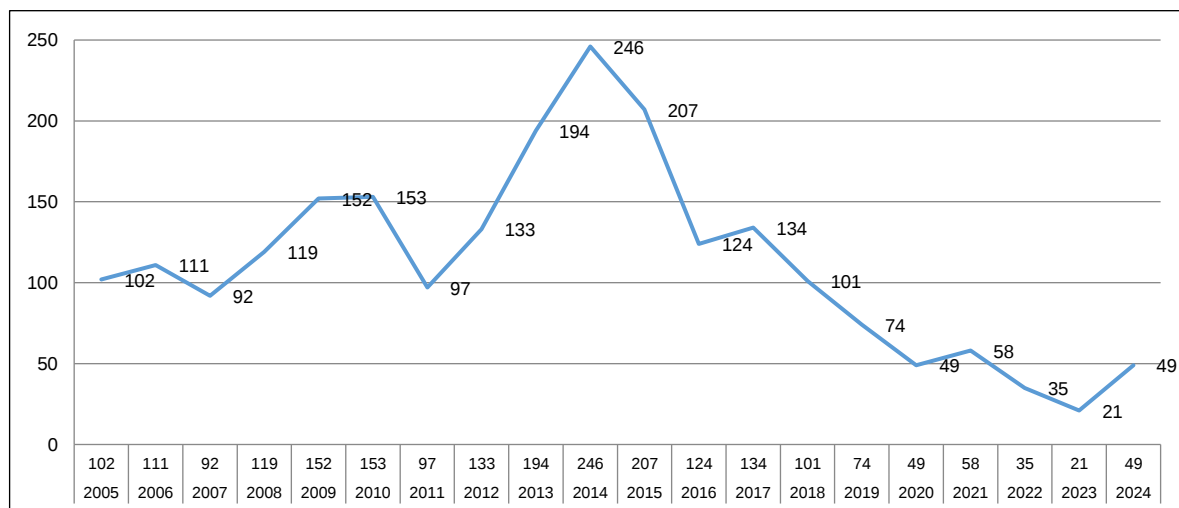
Figura 9. Comportamiento de la rabia en perro, gato, zorro, murciélago. Colombia. Periodo 1973 a 2024



Fuente: Tomado de MSPS – SSA – INS – SIVIGILA.

Un análisis de la Epidemiología de la rabia en perro en Colombia encontró que dicha patología en perros ha mostrado patrones descendentes desde 1981, con aumentos cíclicos leves aproximadamente cada ocho años; así mismo observó que los casos de rabia humana acompañan el descenso de la rabia en perros de manera más o menos continua hasta la presentación de varios brotes de rabia humana en el departamento de Chocó en 2003 (55).

Figura 10. Comportamiento de la rabia en herbívoros en Colombia en el periodo 2005-2024.



Fuente: Tomado de ICA, Boletín Epidemiológico Pecuario 2012 - 2019 y Boletín Interactivo Epidemiológico Pecuario 2020 a 2024

En la Figura 10, puede observarse la tendencia a la baja en la presentación de focos de rabia en herbívoros en Colombia que han sido notificados por el ICA. Esto puede estar asociado a la ampliación en las zonas de vacunación antirrábica en bovinos y bufalinos establecidas por el ICA en zonas de riesgo, así como el establecimiento de la obligatoriedad de esta para productores, por lo que se reducirían las poblaciones de animales susceptibles de sufrir la enfermedad.

Los murciélagos juegan un papel primordial como reservorios de distintas variantes del virus rábico en el país. Su amplia distribución nacional y diversidad de especies facilitan la persistencia del ciclo silvestre, que ocasionalmente puede transmitirse a animales domésticos de compañía (perros y gatos) y al ser humano. El monitoreo de la rabia en quirópteros por parte de las autoridades sanitarias es por lo tanto fundamental para la vigilancia epidemiológica de la enfermedad.

En la siguiente tabla se registra la población estimada de perros y gatos en Colombia por departamento para la vigencia 2025, y así mismo la población objetivo a vacunar por parte de las Entidades Territoriales.

Tabla 7. Población estimada de perros y gatos por Entidades Territoriales en Colombia 2025

Departamento / Distrito	Población Humana (2025)	Población de Perros (2025)	Población de Gatos (2025)	Población perros y gatos (2025)	Población de perros y gatos a vacunar por particulares 20%	Proporción de perros y gatos susceptible de vacunar por las ET (80%)	Número de perros y gatos a vacunar por la ET 2025 de acuerdo con nivel de riesgo
AMAZONAS	87.480	10.678	4.374	15.052	3.010	12.042	9.633
ANTIOQUIA	6.951.825	699.281	365.346	1.064.627	212.925	851.702	692.361
ARAUCA	320.723	46.515	20.374	66.889	13.378	53.511	51.641
ATLÁNTICO	1.502.351	184.140	86.626	270.766	54.153	216.613	173.290
BARRANQUILLA	1.342.818	143.363	78.518	221.881	44.376	177.505	142.004

Impacto del cambio climático en la dinámica de zoonosis en Colombia:
un modelo de sistemas en Vensim bajo el enfoque One Health

BOGOTÁ	8.034.649	1.152.353	412.788	1.565.141	313.028	1.252.113	1.001.690
BOLÍVAR	1.212.889	168.686	65.459	234.145	46.829	187.316	154.853
BOYACÁ	1.324.122	225.936	89.026	314.962	62.992	251.970	202.816
BUENAVENTURA	324.644	40.516	18.007	58.523	11.705	46.818	37.455
CALDAS	1.051.282	108.851	68.205	177.056	35.411	141.645	113.316
SANTIAGO DE CALI	2.285.099	253.761	114.255	368.016	73.603	294.413	235.530
CAQUETÁ	430.884	60.611	31.300	91.911	18.382	73.529	60.823
CARTAGENA	1.065.881	105.963	53.294	159.257	31.851	127.406	101.925
CASANARE	481.938	90.881	46.953	137.834	27.567	110.267	91.214
CAUCA	1.590.171	193.088	80.872	273.960	54.792	219.168	176.397
CESAR	1.414.859	147.430	72.044	219.474	43.895	175.579	150.483
CHOCÓ	615.082	62.844	30.888	93.732	18.746	74.985	59.988
CÓRDOBA	1.929.336	258.011	113.325	371.336	74.267	297.069	240.655
CUNDINAMARCA	3.657.427	425.147	207.720	632.867	126.573	506.294	405.035
GUAINÍA	59.240	6.865	2.962	9.827	1.965	7.862	7.301
GUAVIARE	103.237	23.781	9.790	33.571	6.714	26.857	21.845
HUILA	1.205.318	162.701	67.154	229.855	45.971	183.884	157.906
LA GUAJIRA	1.073.851	111.667	53.726	165.393	33.079	132.314	120.849
MAGDALENA	962.388	169.391	68.495	237.886	47.577	190.309	170.574
META	1.160.351	161.869	106.272	268.141	53.628	214.513	171.610
NORTE DE SANTANDER	1.717.992	215.825	85.900	301.725	60.345	241.380	225.349
NARIÑO	1.160.351	161.869	106.272	372.983	74.597	298.386	240.709
PUTUMAYO	393.988	34.377	15.287	49.664	9.933	39.731	31.786
QUINDÍO	568.560	113.672	69.413	183.085	36.617	146.468	117.174
RISARALDA	974.639	108.072	59.585	167.657	33.531	134.125	107.300
SAN ANDRÉS	62.181	9.232	3.236	12.468	2.494	9.974	7.980
SANTA MARTA	566.650	62.365	51.026	113.391	22.678	90.713	72.570
SANTANDER	2.393.214	271.752	125.018	396.770	79.354	317.416	253.932

Impacto del cambio climático en la dinámica de zoonosis en Colombia:
un modelo de sistemas en Vensim bajo el enfoque One Health

SUCRE	1.016.826	124.493	52.908	177.401	35.480	141.921	117.895
TOLIMA	1.386.826	184.056	92.145	276.201	55.240	220.961	176.769
VALLE DEL CAUCA	2.042.769	238.048	132.654	370.702	74.140	296.561	237.249
VAUPÉS	49.142	5.180	2.457	7.637	1.527	6.110	4.888
VICHADA	127.467	21.139	6.543	27.682	5.536	22.145	18.701
TOTAL NACIONAL	52.648.450	6.564.409	3.070.217	9.739.468	1.947.889	7.791.575	6.363.496

Fuente: Tomado de MSPS – SSA

A lo largo del período 1999–2025, Colombia ha registrado al menos 39 casos de rabia humana, en su mayoría asociados al contacto directo o indirecto con animales domésticos no vacunados o con fauna silvestre. En paralelo, las coberturas de vacunación antirrábica canina han aumentado de manera sostenida, pasando de niveles inferiores al 50 % en los primeros años del siglo XXI, hasta superar el 80 % en la actualidad.

Anexo B. Consideraciones éticas y de gobernanza de datos

El desarrollo de modelos epidemiológicos multicomponente, como los utilizados en este estudio bajo el enfoque *One Health*, requiere no solo rigurosidad técnica, sino también un abordaje ético que respete principios de privacidad, equidad, transparencia y colaboración. Aunque en este caso se trabajará exclusivamente con bases de datos **anonimizadas, agregadas y consolidadas de origen institucional**, es fundamental reflexionar sobre las implicaciones éticas del uso de información intersectorial y sensible, especialmente cuando se modelan procesos que involucran la salud humana, animal y ambiental.

La siguiente tabla resume las principales **consideraciones éticas y de gobernanza de datos** que deben contemplarse en estudios de modelado epidemiológico con enfoque sistémico.

Tabla 8. Consideraciones éticas y de gobernanza de datos en el modelado epidemiológico

Categoría	Consideraciones clave
Privacidad	No se utilizarán datos individuales ni identificables. Toda la información proviene de registros anonimizados y agrupados, garantizando la confidencialidad de personas y animales.
Acceso	Las fuentes de información provendrán de bases de datos oficiales, públicas o con autorización institucional, tales como SIVIGILA, el IDEAM, el ICA, o boletines del Instituto Nacional de Salud; entre otras fuentes oficiales del orden nacional.
Transparencia	El modelo computacional (estructura, ecuaciones, supuestos y resultados) será documentado de forma abierta y accesible, facilitando la revisión por parte de expertos y tomadores de decisión.
Equidad	Se evitarán sesgos geográficos, poblacionales o sectoriales. Se procurará representar con equidad a las diferentes poblaciones humanas, animales y regiones afectadas, incluyendo grupos tradicionalmente subrepresentados.
Colaboración intersectorial	Se fomenta la articulación de actores clave en cada sector: – Salud humana: epidemiólogos, entes territoriales, clínicas, laboratorios. – Salud animal: médicos veterinarios, ICA, programas de vigilancia zoonótica. – Ambiente: IDEAM, autoridades ambientales regionales. Esta integración asegura la interpretación contextual de los datos y permite una gestión de políticas más coordinada, coherente y eficaz.

Fuente: Elaboración propia (4,24) experiencias intersectoriales en vigilancia epidemiológica

Anexo C. Guía para la Organización y Análisis de Variables bajo *One Health*.

La presente guía tiene como propósito recolectar, organizar y analizar, desde el enfoque de Una Sola Salud (*One Health*), toda la información necesaria para modelar la relación entre el cambio climático y la ocurrencia y distribución de la zoonosis seleccionada (rabia ciclo urbano), previamente descrita. El análisis se realizará utilizando el software Vensim® (*Personal Learning Edition* -PLE)¹, herramienta orientada al aprendizaje y el desarrollo de modelos de sistemas dinámicos en contextos educativos y de investigación aplicada.

Variables Epidemiológicas (Humanos y Animales).

Casos humanos confirmados (rabia urbana, rabia silvestre, leptospirosis).

Casos humanos sospechosos o expuestos (mordeduras, contacto directo con animales o agua contaminada).

Casos animales positivos (perros, bovinos, murciélagos).

Cobertura de vacunación animal y eficacia estimada del biológico.

Mortalidad humana atribuible a zoonosis.

Acceso y disponibilidad de tratamiento posexposición (PEP) en humanos.

Variables Ambientales y Climáticas.

Temperatura media anual y mensual (°C).

Intervenciones en Salud Pública.

¹Principales características de Vensim® PLE.

- **Acceso gratuito** para fines académicos, educativos o personales.
- **Herramientas de modelado** que permiten crear diagramas causales y de flujo para comprender la estructura y evolución de sistemas complejos.
- **Interfaz simplificada**, con un conjunto de funciones reducido en comparación con las versiones profesionales, lo que facilita su uso para quienes se inician en la dinámica de sistemas.
- **Entorno didáctico**, ideal para aprender los fundamentos de la simulación y el pensamiento sistémico.
- **Recursos integrados**, como ejemplos de modelos, manual del usuario en formato PDF y un sistema de ayuda interactivo que guía el proceso de aprendizaje.

Número y cobertura de campañas de vacunación animal (por año y por zona).

Actividades de educación, comunicación y sensibilización comunitaria.

Programas de control de murciélagos y vigilancia epidemiológica veterinaria.

Medidas de saneamiento ambiental (urbano y rural).

Grado de participación interinstitucional e intersectorial (salud, ambiente, agropecuario, educación).

Fuentes de Datos Recomendadas.

INS – Instituto Nacional de Salud (SIVIGILA): notificación de eventos en salud pública humana.

DANE – Departamento Administrativo Nacional de Estadística: información sociodemográfica y territorial.

Secretarías de Salud y Ambiente de Entes Territoriales: registros locales y reportes de intervención.

Literatura científica: bases de datos SciELO, PubMed y Google Scholar, Scopus, Redalyc, etc entre otras para revisión y validación de evidencia.

Estrategia de Búsqueda Bibliográfica en Bases de Datos Científicas.

Tiene como propósito **orientar la búsqueda, selección y organización de información científica y técnica** relevante para el modelamiento de la relación entre el **cambio climático y la dinámica de zoonosis**, bajo el enfoque de **Una Sola Salud (One Health)**, permitiendo gestionar y completar las variables necesarias e incluidas en el modelo construido con **Vensim Personal Learning Edition (PLE)**, fortaleciendo la validez conceptual y empírica del análisis.

Matriz ecuación de búsqueda.xlsx - Excel

Archivo Inicio Insertar Disposición de página Fórmulas Datos Revisar Vista Ayuda

Pegar Fuente Alineación Número Estilos

Calibri 11 A⁺ A⁻

N K

Ajustar texto Combinar y centrar

General \$ % 000 0.00 0.00

Formato condicional Dar formato como tabla Estilos de celda

Portapapeles Fuente Alineación Número Estilos

T39

1 **Introduce breves palabras clave que describen tu tema de investigación.**

2 **Encuentra que palabras clave o sea más términos que refieren lo que estás buscando en concepto.**

3 **Si tu palabra clave tiene más de dos términos, ponlos entre comillas. Ej. "homo right".**

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

19

20

21

22

23

24

25

26

27

28

29

30

31

32

33

34

35

36

37

38

39

40

41

42

43

44

45

46

47

48

49

50

51

52

53

54

55

56

57

58

59

60

61

62

63

64

65

66

67

68

69

70

71

72

73

74

75

76

77

78

79

80

81

82

83

84

85

86

87

88

89

90

91

92

93

94

95

96

97

98

99

100

101

102

103

104

105

106

107

108

109

110

111

112

113

114

115

116

117

118

119

120

121

122

123

124

125

126

127

128

129

130

131

132

133

134

135

136

137

138

139

140

141

142

143

144

145

146

147

148

149

150

151

152

153

154

155

156

157

158

159

160

161

162

163

164

165

166

167

168

169

170

171

172

173

174

175

176

177

178

179

180

181

182

183

184

185

186

187

188

189

190

191

192

193

194

195

196

197

198

199

200

201

202

203

204

205

206

207

208

209

210

211

212

213

214

215

216

217

218

219

220

221

222

223

224

225

226

227

228

229

230

231

232

233

234

235

236

237

238

239

240

241

242

243

244

245

246

247

248

249

250

251

252

253

254

255

256

257

258

259

260

261

262

263

264

265

266

267

268

269

270

271

272

273

274

275

276

277

278

279

280

281

282

283

284

285

286

287

288

289

290

291

292

293

294

295

296

297

298

299

300

301

302

303

304

305

306

307

308

309

310

311

312

313

314

315

316

317

318

319

320

321

322

323

324

325

326

327

328

329

330

331

332

333

334

335

336

337

338

339

340

341

342

343

344

345

346

347

348

349

350

351

352

353

354

355

356

357

358

359

360

361

362

363

364

365

366

367

368

369

370

371

372

373

374

375

376

377

378

379

380

381

382

383

384

385

386

387

388

389

390

391

392

393

394

395

396

397

398

399

400

401

402

403

404

405

406

407

408

409

410

411

412

413

414

415

416

417

418

419

420

421

422

423

424

425

426

427

428

429

430

431

432

433

434

43

Esta búsqueda dirigida permite identificar y recopilar evidencia científica, estudios de sistemas dinámicos y de modelos, reportes institucionales y experiencias intersectoriales que aporten información sobre rabia urbana, rabia silvestre, leptospirosis y su relación con factores climáticos, ambientales, sociales y de salud pública.

PubMed / MEDLINE: literatura biomédica y de salud pública.

SciELO: publicaciones científicas de América Latina y el Caribe.

Google Scholar: fuentes académicas amplias y literatura gris.

Scopus / Web of Science: artículos revisados por pares de alto impacto.

80

enfoque **Una Sola Salud**, ya que cubren la interfaz entre salud animal, ambiente, agricultura y desarrollo rural.

Palabras clave sugeridas (en inglés y español)

Tabla 10. Palabras clave sugeridas (en inglés y español)

Categoría	Palabras clave
Enfoque conceptual	<i>“One Health”, “Una Sola Salud”, “integrated health”, “intersectoral collaboration”</i>
Modelización y herramientas	<i>“Vensim”, “system dynamics”, “simulation model”, “modelado dinámico”, “simulación de sistemas”</i>
Cambio climático	<i>“climate change”, “climate variability”, “environmental factors”, “cambio climático”, “variabilidad climática”</i>
Zoonosis específicas	<i>“rabies”, “rabia urbana”, “rabia silvestre”, “leptospirosis”, “zoonotic diseases”</i>
Determinantes y contexto social	<i>“social determinants”, “socioeconomic factors”, “rural health”, “determinantes sociales”</i>
Intervenciones y vigilancia	<i>“public health intervention”, “educación sanitaria”, “vacunación animal”, “control de murciélagos”</i>

Fuente: Elaboración propia

Recomendaciones metodológicas

Definir filtros temporales: priorizar literatura de los últimos **10 años**, salvo fuentes institucionales de referencia.

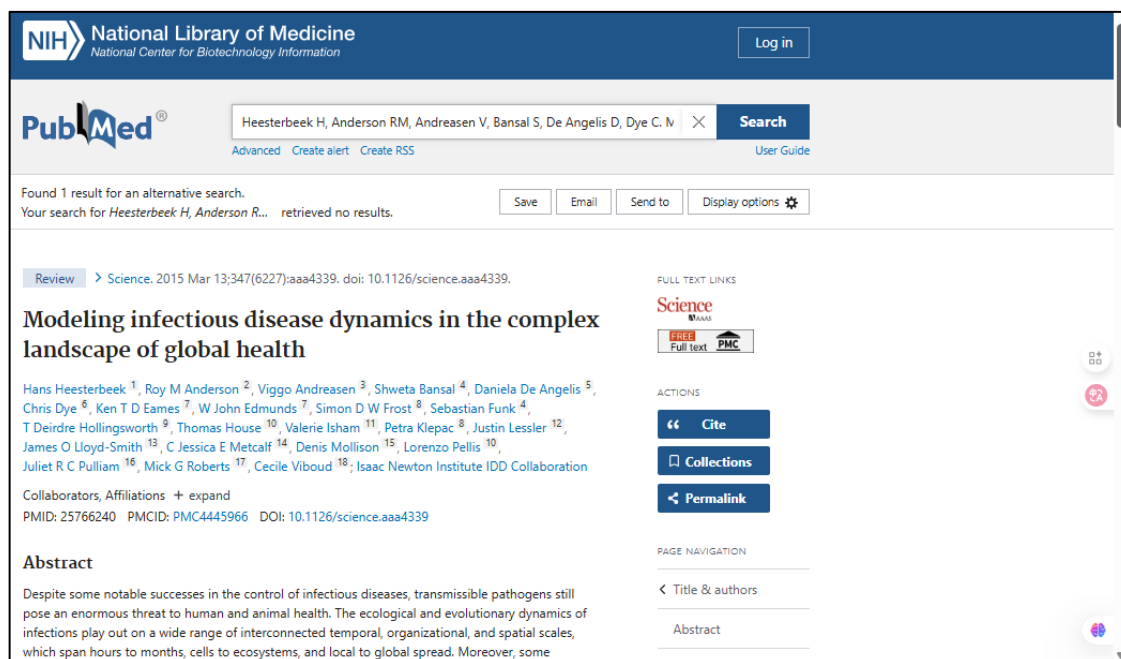
Usar operadores booleanos (AND, OR, NOT) para combinar o excluir términos.

Aplicar descriptores MeSH o DeCS en bases estructuradas como PubMed y SciELO.

Exportar referencias en formato **RIS o BibTeX** para su incorporación en gestores bibliográficos como **Mendeley**.

Evaluar la calidad de las fuentes, dando prioridad a estudios revisados por pares, informes técnicos oficiales (OPS, FAO, OMS, INS, IDEAM, ICA) y literatura científica con pertinencia geográfica (Colombia, América Latina).

Figura 11. Captura de pantalla sobre búsqueda referencias bibliográficas en PubMed

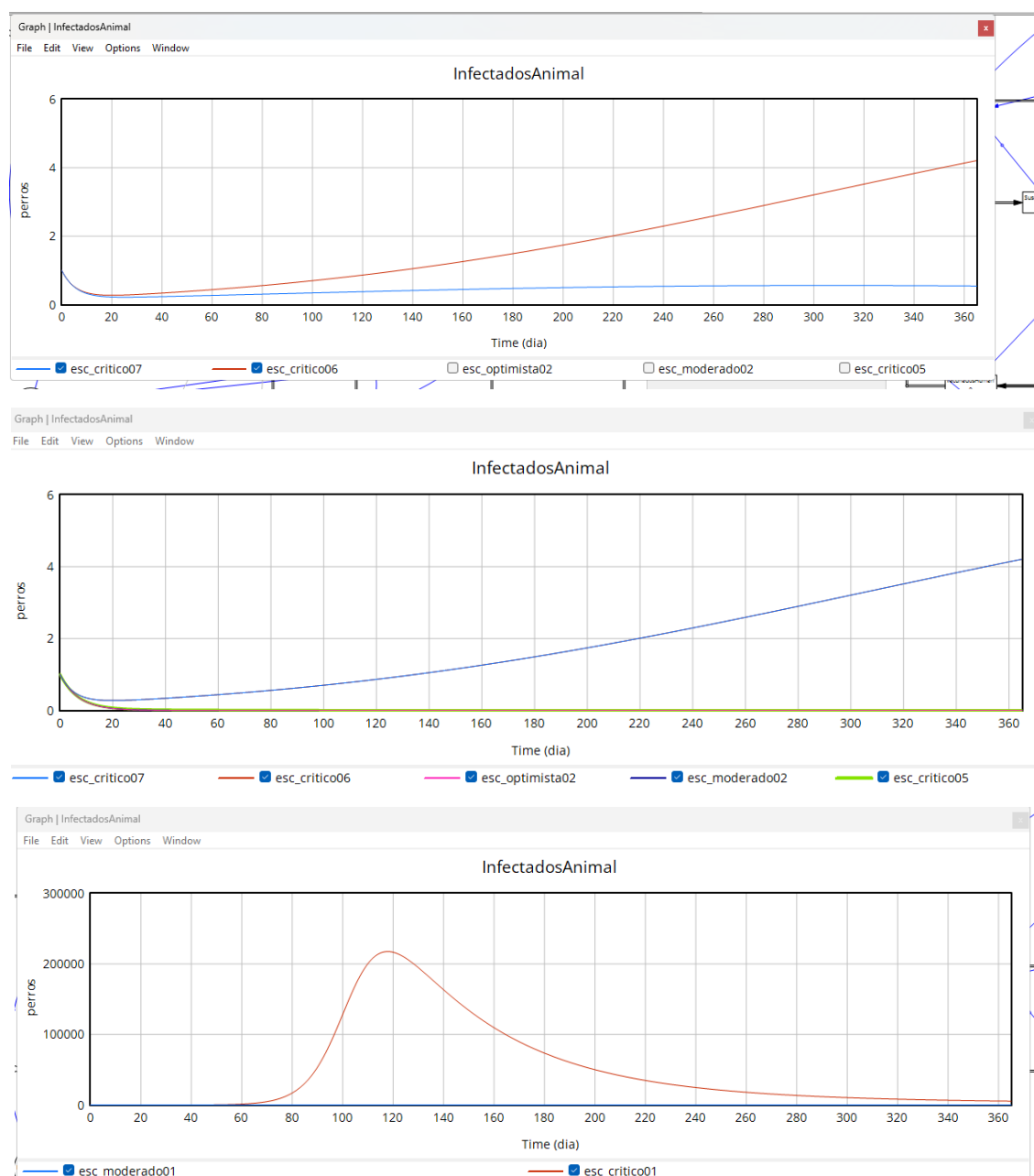


Fuente. Elaboración propia

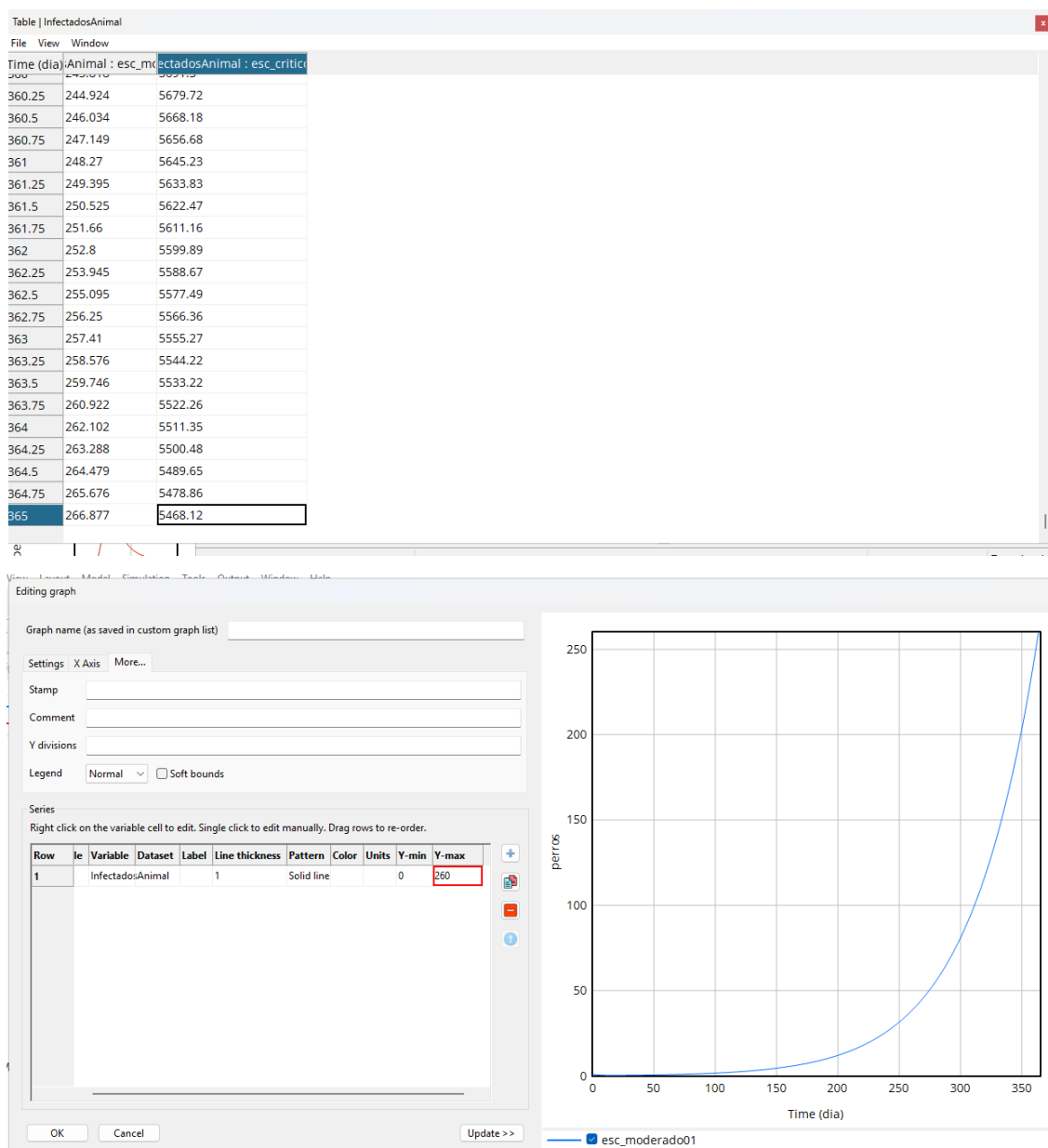
El uso de esta estrategia permitirá construir una **base bibliográfica sólida, actualizada contextualizada**, que respalde el **modelo dinámico desarrollado en Vensim® PLE**, fortaleciendo su **rigurosidad técnica y coherencia científica** dentro del marco del enfoque **Una Sola Salud (One Health)**, con el apoyo del **gestor bibliográfico Mendeley** para la organización, citación y manejo de referencias.

Anexo D. Capturas de pantalla correspondientes a la diagramación, calibración, validación y funcionamiento del modelo general e integral de SEIVD rabia.

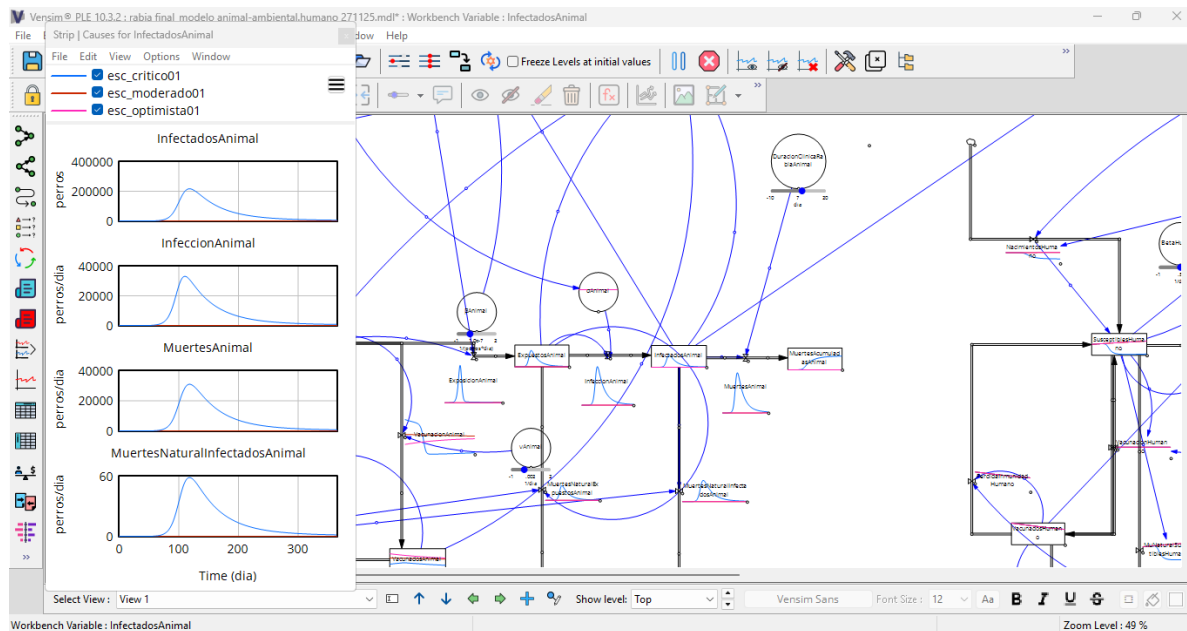
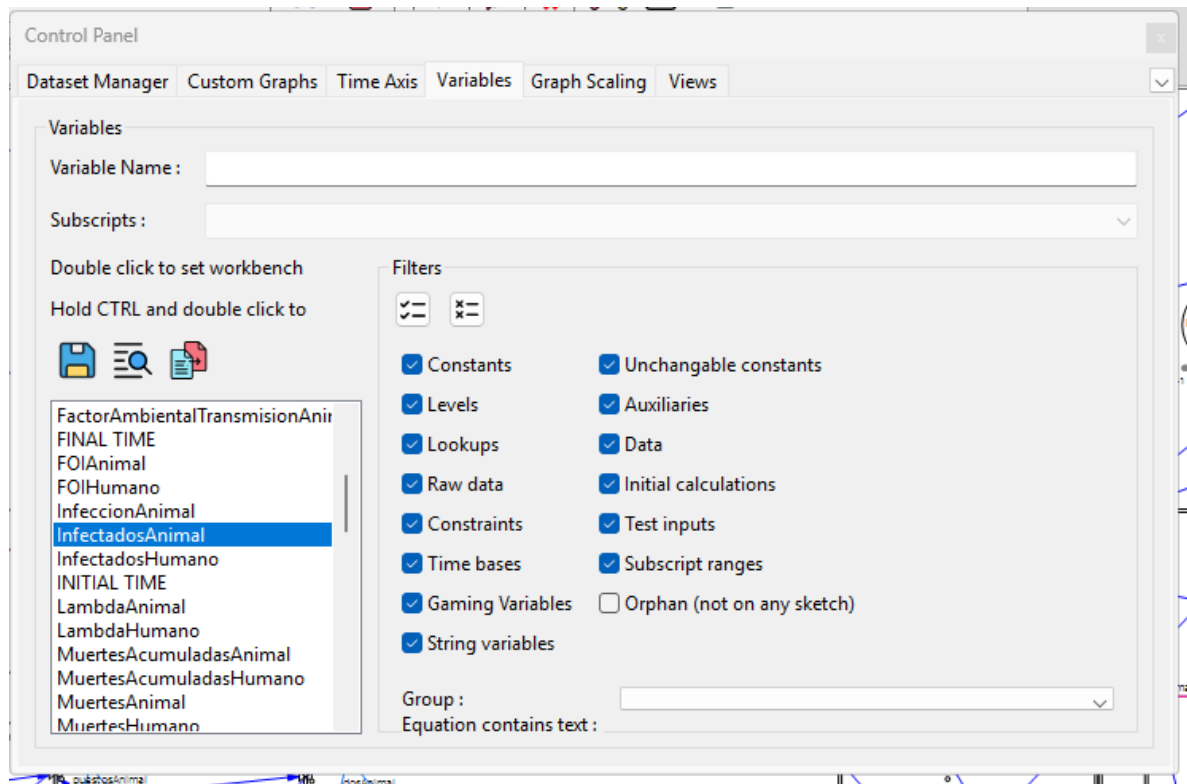
A través de las siguientes ilustraciones se desea mostrar de una manera general algunos ejemplos y prácticas adelantadas durante el desarrollo de este sistema dinámico, donde puede observarse la gran variedad de mecanismos de manejo de los datos y salidas gráficas de la información para una mejor toma de decisiones.



Impacto del cambio climático en la dinámica de zoonosis en Colombia:
un modelo de sistemas en Vensim bajo el enfoque One Health



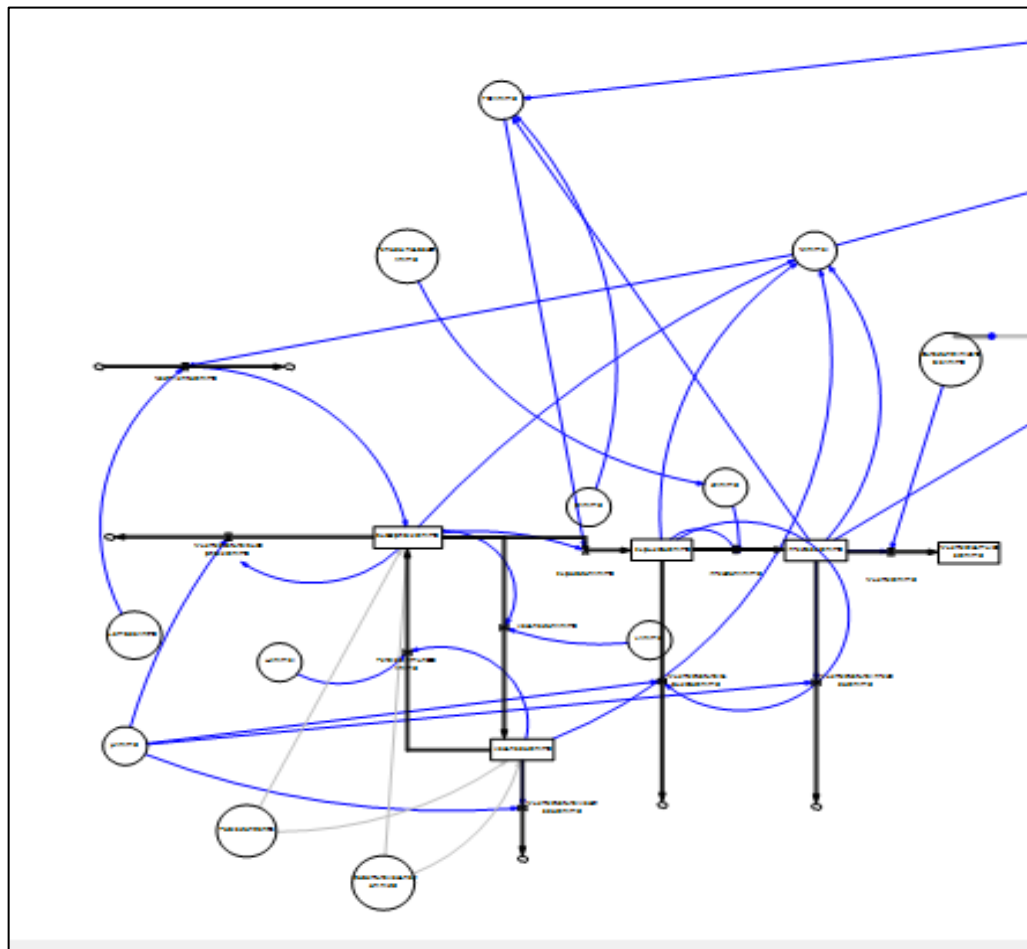
Impacto del cambio climático en la dinámica de zoonosis en Colombia:
un modelo de sistemas en Vensim bajo el enfoque One Health



Anexo E. Diagramas y parámetros epidemiológicos y ambientales utilizados para las simulaciones de los diferentes escenarios

Elaboradas con el apoyo técnico de las siguientes referencias bibliográficas (37,38,56).

Figura 12. *Submodelo animal del SEIVD para rabia canina*



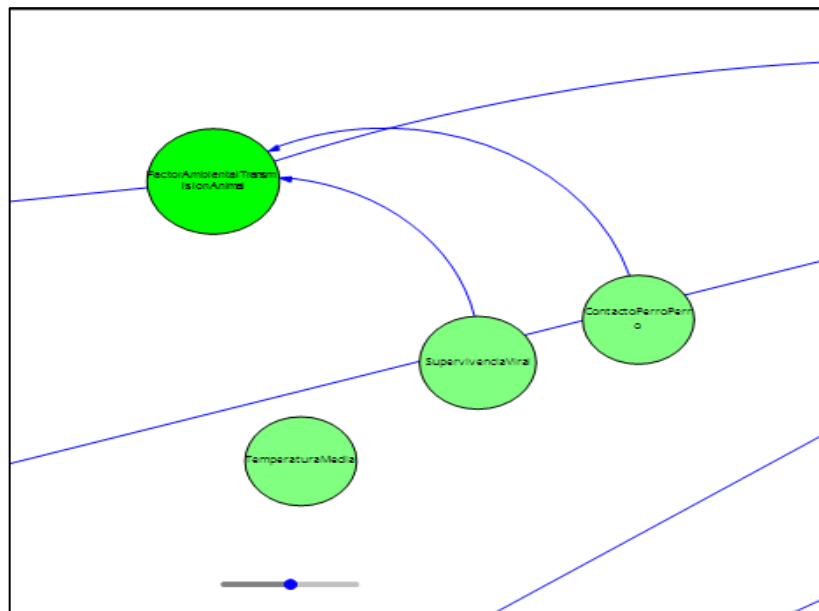
Fuente: Elaboración propia a partir de la modelación realizada en Vensim

Tabla 11. *Parámetros del submodelo animal del SEIVD para rabia canina*

Parámetro (símbolo)	Nombre en Vensim / significado	Valor numérico	Unidades	Comentario
(N_{animal})	PoblacionAnimal	6 289 122	perros	Población canina total considerada en el modelo
(N_{vac})	PoblacionAnimalVacunada	3 828 581	perros	Población canina con antecedente de vacunación (≈61 % de (N_{animal}))
(D_{clin})	DuracionClinicaRabiaAnimal	7	días	Duración de la fase clínica/infecciosa en perros
(\gamma_{animal})	(no aparece como tal, pero es (1/D_{clin}))	(1/7) ≈ 0,1429	1/día	Tasa de salida de InfectadosAnimal por muerte clínica
(T_{inc})	PeriodoIncubacionAnimal	45	días	Periodo promedio de incubación de la rabia canina
(\sigma_{animal})	$\sigma_{Animal} = 1 /$ PeriodoIncubacionAnimal	(1/45) ≈ 0,0222	1/día	Tasa de paso de ExpuestosAnimal a InfectadosAnimal
(\omega_{animal})	ω_{Animal}	(1/(365*2)) ≈ 0,00137	1/día	Pérdida de inmunidad postvacunal (duración ≈ 2 años)
(\mu_{animal})	μ_{Animal}	0,00027	1/día	Mortalidad natural de la población canina
(\lambda_{animal})	Lambanimal	0	perros/día	Tasa de Natalidad
(\mu_{Animal})	Mortalidad natural canina	6 años	1/día	Basado en esperanza de vida canina
(E_0)	Expuestos iniciales	0	perros	Supuesto
(I_0)	Infectados iniciales	1	perros	Caso índice

Fuente: Elaboración propia con base en literatura científica (INS, OMS/OPS) utilizados en las simulaciones.

Figura 13. Submodelo ambiental del SEIVD para rabia canina



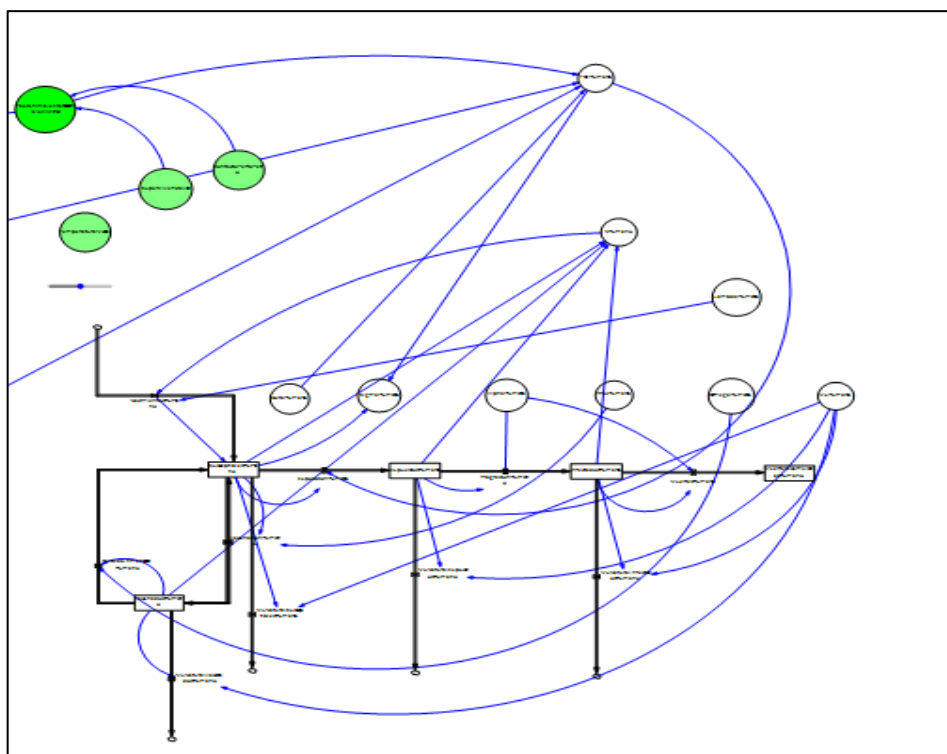
Fuente: Elaboración propia a partir de la modelación realizada en Vensim

Tabla 12. Parámetros del submodelo ambiental del SEIVD para rabia canina

Parámetro	Nombre en el modelo	Descripción	Valor por escenario	Unidades
TemperaturaMedia	TemperaturaMedia	Temperatura promedio ambiental utilizada para modificar la supervivencia viral	Crítico: 10 °C Moderado: 22 °C Optimista: 30 °C	°C
SupervivenciaViral	SupervivenciaViral	Factor multiplicador que ajusta la persistencia del virus en el ambiente (entre 0 y 1)	Crítico: 1.0 Moderado: 0.7 Optimista: 0.3	Adimensional
ContactoPerroPerro	contacto perroperro	Probabilidad de contacto efectivo entre animales susceptibles y expuestos/infectados	Constante (igual en los tres escenarios) → (valor según el modelo)	1/día u otro que definas
FactorAmbientalTransmisionAnimal	FactorAmbientalTransmisionAnimal	Modificador ambiental que ajusta la tasa de transmisión (β_{animal}).		
Incluye los efectos combinados de clima, comportamiento canino y persistencia viral.	Depende de: TemperaturaMedia, SupervivenciaViral, ContactoPerroPerro. Por eso se considera un parámetro ambiental integrado.	Adimensional		

Fuente: Elaboración propia con base en literatura científica (INS, OMS/OPS) utilizados en las simulaciones.

Figura 14. Submodelo humano del SEIVD para rabia canina



Fuente: Elaboración propia a partir de la modelación realizada en Vensim

Tabla 13. Parámetros del submodelo humano del SEIVD para rabia canina

Parámetro	Símbolo	Descripción breve	Unidad
Población humana total inicial	NHumano	Población humana en el área de estudio	personas
Susceptibles humanos iniciales	SHumano0	Personas susceptibles al inicio	personas
Expuestos humanos iniciales	EHumano0	Personas expuestas al virus al inicio	personas
Infectados humanos iniciales	IHumano0	Personas con rabia en el tiempo 0	personas
Vacunados humanos (pre o pos exposición)	VHumano0	Personas protegidas por vacunación	personas
Tasa de transmisión perro–humano	β Humano	Probabilidad de contagio por contacto con perro rabioso	1/día
Fuerza de infección humana	FOIHumano	Tasa a la que los susceptibles se exponen al virus	1/día
Periodo de incubación humano	$1/\sigma$ Humano	Tiempo medio incubación desde exposición a síntomas	días

Impacto del cambio climático en la dinámica de zoonosis en Colombia:
un modelo de sistemas en Vensim bajo el enfoque One Health

Parámetro	Símbolo	Descripción breve	Unidad
Periodo clínico humano	$1/\gamma_{\text{Humano}}$	Duración de la fase clínica antes de muerte	días
Mortalidad natural humana	μ_{Humano}	Mortalidad natural independiente de la rabia	1/día
Letalidad específica de rabia humana	α_{Humano}	Proporción de infectados que fallecen por rabia	dmnl
Cobertura de profilaxis post-exposición	CPE	Proporción de personas expuestas que reciben PEP	fracción

Fuente: Elaboración propia con base en literatura científica (INS, OMS/OPS) utilizados en las simulaciones.

Anexo F. [Acta reunión espacio de trabajo Ministerio de Salud y Protección Social.](#)

