



# **Análisis de la Propagación de Enfermedades Infecciosas mediante Modelos Gráficos de Movilidad Humana**

**Luciana Julissa Huaman Coaquira**

**Orientador: Prof Dr./Mag./Ing. Nombre del Asesor**

*Plan de Tesis presentado la Escuela Profesional Ciencia  
de la Computación como paso previo a la elaboración de  
la Tesis Profesional.*

**UNSA - Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa  
Junio de 2025**

## 1. Introducción

Las enfermedades infecciosas representan una amenaza constante para la salud pública mundial. La pandemia de COVID-19 evidenció cómo la rápida propagación de agentes patógenos puede sobrecargar los sistemas sanitarios, impactar la economía global y alterar significativamente la vida cotidiana de las personas (World Health Organization, 2024). Este contexto de crisis sanitaria ha resaltado la necesidad urgente de sistemas predictivos más eficaces para manejar brotes globales, donde la movilidad humana juega un papel crucial (Kang et al., 2020).

Estudios recientes han demostrado que la movilidad humana, especialmente a través de redes de transporte aéreo y terrestre, es un factor crucial para la propagación de enfermedades infecciosas, ya que conecta de manera dinámica distintas poblaciones y regiones (Cao et al., 2023; Lessani et al., 2024). De hecho, en Brasil, estudios como el de Oliveira et al. (2023) proponen un modelo híbrido que combina bases de datos gráficas con datos reales de movilidad y modelos epidemiológicos para rastrear la propagación de enfermedades, destacando la efectividad de esta integración para capturar dinámicas complejas de contagio (Oliveira et al., 2023). Este tipo de enfoques, que utilizan la movilidad como un vector de propagación, se alinea con los modelos metapoblacionales, los cuales son cada vez más aplicados para entender las interacciones entre regiones y cómo estas afectan la expansión de brotes epidémicos.

El rápido avance de las tecnologías y el uso de modelos basados en redes neuronales y aprendizaje automático, como lo han demostrado Feng et al. (2024) y Wan et al. (2024), ha permitido realizar simulaciones descriptivas para visualizar la evolución epidémica y detectar patrones clave (Feng et al., 2024; Wan et al., 2024). Estos modelos ayudan a comprender la propagación de enfermedades a través de datos masivos de transporte, facilitando la toma de decisiones en tiempo real (Mason et al., 2023; Peng et al., 2025). Sin embargo, como han señalado autores como Cao et al. (2023) y Zhang et al. (2022), existen desafíos importantes en términos de calidad y cobertura de datos, heterogeneidad espacial y temporal, y la validación de modelos híbridos, lo que limita su aplicación práctica en escenarios reales (Cao et al., 2023; Zhang et al., 2022).

Este proyecto busca abordar estas brechas mediante el uso de bases de datos de transporte aéreo y terrestre, desarrollando modelos metapoblacionales basados en grafos y simulaciones de ecuaciones diferenciales para describir la propagación de enfermedades. Además, se propone el desarrollo de una plataforma avanzada de análisis visual y simulación, que combine el poder predictivo de los modelos de movilidad con la claridad de la visualización interactiva, facilitando la toma de decisiones y el análisis detallado para el control de epidemias. Esta herramienta de visualización interactiva no solo permitirá modelar el comportamiento de las enfermedades, sino también simular políticas públicas como restricciones de movilidad o cuarentenas, evaluando su efectividad antes de su implementación.

En cuanto a los objetivos de esta investigación, el principal objetivo es el diseño, desarrollo e implementación de una herramienta de visualización interactiva que integre datos heterogéneos de movilidad humana para rastrear, analizar y comunicar la propagación espacial y temporal de enfermedades infecciosas. Esta plataforma permitirá no

solo explorar dinámicas de propagación, sino también evaluar el impacto de diferentes intervenciones, como bloqueos o teletrabajo, facilitando la toma de decisiones en salud pública. Asimismo, se espera que este enfoque basado en modelos gráficos y redes neuronales sea una innovación significativa en el análisis de la propagación de enfermedades y en la visualización de escenarios epidemiológicos (Feng et al., 2024).

## 2. Trabajos Relacionados

El uso de modelos metapoblacionales ha demostrado ser efectivo para predecir la propagación de epidemias a través de diversas regiones. En este sentido, Cao et al. (2023) propusieron un modelo híbrido que combina redes neuronales gráficas (GNN) con el modelo SIR metapoblacional, el cual integra datos heterogéneos, incluyendo patrones de movilidad humana, para realizar predicciones más precisas. Los resultados de su investigación muestran que este enfoque supera a los modelos tradicionales de predicción, ofreciendo una mayor interpretabilidad y precisión en la propagación de enfermedades infecciosas (Cao et al., 2023).

Por otro lado, Li et al. (2024) desarrollaron VIVIAN, un sistema de simulación virtual y análisis visual que facilita el rastreo y la evaluación de la propagación de enfermedades en tiempo real. Este sistema utiliza datos de movilidad humana junto con parámetros epidemiológicos para visualizar y evaluar la efectividad de diversas políticas de control, como las restricciones de movilidad y las cuarentenas, permitiendo una mejor toma de decisiones sobre intervenciones sanitarias (Li et al., 2024).

Además, en Brasil, Oliveira et al. (2023) propusieron una metodología basada en bases de datos gráficas y datos de movilidad para rastrear la propagación de enfermedades infecciosas. Su herramienta Epiflow emplea el algoritmo de Dijkstra para modelar las rutas de propagación basadas en los flujos de personas entre ciudades, validando su enfoque con datos de COVID-19. Este trabajo resalta la importancia de las conexiones intermunicipales y cómo estas pueden predecir la propagación de nuevas variantes del virus (Oliveira et al., 2023).

En el ámbito de las restricciones de movilidad, Yang et al. (2022) diseñaron EpiMob, una herramienta de análisis visual interactiva que permite simular y evaluar el impacto de diferentes políticas de restricción de movilidad en la propagación de epidemias. Este sistema facilita la comparación de resultados bajo distintas intervenciones, como bloqueos regionales o teletrabajo, proporcionando a los responsables de políticas públicas una herramienta efectiva para evaluar los efectos de sus decisiones (Yang et al., 2023).

Por último, el trabajo de Mason et al. (2023) introduce EpiVECS, una herramienta que integra técnicas de clustering y reducción dimensional para el análisis de datos espaciotemporales epidemiológicos. Este enfoque permite a los analistas explorar patrones en grandes volúmenes de datos de manera interactiva, facilitando la identificación de tendencias y la generación de hipótesis sobre la propagación de enfermedades (Mason et al., 2023). Asimismo, el enfoque de Feng et al. (2024) en el desarrollo de HoLens presenta un diseño de visualización interactiva para el modelado y análisis de patrones de movimiento de alto orden en entornos urbanos. Esta herramienta permite analizar las

transiciones secuenciales de múltiples pasos en los movimientos de las personas, lo que resulta útil tanto para la planificación urbana como para el rastreo de la propagación de enfermedades (Feng et al., 2024).

### 3. Propuesta de Investigación

#### 3.1. Contexto y Motivación

Las enfermedades infecciosas son una de las mayores amenazas para la salud pública mundial, como lo evidenció la pandemia de COVID-19. La propagación rápida de agentes patógenos puede desbordar los sistemas sanitarios, afectar la economía global y alterar la vida cotidiana de las personas. En particular, la **movilidad humana**, facilitada por redes de transporte aéreo, terrestre y acuático, es un factor crítico en la propagación de enfermedades infecciosas. Los flujos de personas entre distintas regiones actúan como **vectores de propagación**, lo que hace necesario desarrollar modelos que integren **movilidad y propagación de enfermedades** para prever y controlar brotes.

Diversos estudios han demostrado que los **flujos de movilidad** son determinantes en la propagación de enfermedades, y el uso de **modelos gráficos** que representan las ciudades como nodos y las conexiones entre ellas como aristas ponderadas por el flujo de personas ha demostrado ser eficaz para simular estos procesos (Cao et al., 2023; Lessani et al., 2024). Sin embargo, existen desafíos significativos relacionados con la **heterogeneidad de los datos de movilidad**, las **variaciones espaciales y temporales** en las tasas de propagación, y la **visualización interactiva** de estos datos para una **toma de decisiones eficiente**.

Este proyecto tiene como objetivo desarrollar una **plataforma interactiva** que permita la **simulación y análisis** de la propagación de enfermedades infecciosas, aprovechando los **modelos metapoblacionales** y **modelos gráficos**, combinados con **aprendizaje automático**, para mejorar las **predicciones** y facilitar la toma de decisiones en tiempo real en el contexto de salud pública en Brasil.

#### 3.2. Objetivo de la Propuesta

El principal objetivo de esta investigación es **desarrollar un sistema de simulación y análisis** para modelar la **propagación de enfermedades infecciosas** utilizando **datos de movilidad humana**. Este sistema integrará **modelos de propagación metapoblacionales** y **redes neuronales gráficas (GNN)**, junto con **algoritmos de propagación**, para analizar cómo las enfermedades se propagan entre las regiones. Además, se diseñará una **herramienta visual interactiva**, denominada **Epiflow**, que permitirá a los usuarios explorar los escenarios de propagación y simular intervenciones en movilidad, como **cuarentenas o restricciones de transporte**.

### 3.3. Metodología Propuesta

La metodología para abordar la propagación de enfermedades infecciosas se estructura en los siguientes pasos:

#### 1. Recopilación y Preprocesamiento de Datos:

- Se recogerán **datos de movilidad humana** desde diversas fuentes oficiales como **ANTT**, **ANAC**, **IBGE**, y **SUS**. Los datos incluirán información sobre **flujos de pasajeros** entre ciudades, regiones, y tipos de transporte (terrestre, aéreo, acuático).
- Los datos serán procesados mediante un flujo **ETL (Extract, Transform, Load)**, asegurando su calidad y adecuación para su integración en el modelo.
- Se integrarán **datos epidemiológicos** (tasas de infección, recuperación y mortalidad) para cada región, los cuales se obtendrán de **SUS** y **IBGE**.

#### 2. Construcción del Grafo de Propagación:

- Se construirá un **grafo dirigido** utilizando herramientas como **Neo4j** o **NetworkX**, donde cada **ciudad** será representada como un **nodo** y los **flujos de movilidad** como **aristas** entre ellos.
- Las aristas serán ponderadas según el **número de pasajeros** entre las ciudades y el tipo de transporte utilizado.

#### 3. Desarrollo del Modelo de Propagación:

- Se implementará un **modelo SIR metapoblacional** para simular la propagación de enfermedades infecciosas entre ciudades. Cada ciudad será tratada como una **subpoblación** que interactúa con otras subpoblaciones (ciudades) mediante los flujos de movilidad.
- Se integrarán **Redes Neuronales Gráficas (GNN)** para modelar la **interdependencia espacial** entre las ciudades, ajustando dinámicamente los parámetros de propagación de la enfermedad en función de los flujos de personas.

#### 4. Simulación de Propagación y Evaluación:

- Se utilizarán **algoritmos de propagación** adaptados para simular cómo la enfermedad se propaga entre las ciudades, utilizando el grafo de movilidad.
- Se simularán diferentes escenarios de intervención, tales como **restricciones de movilidad** (cuarentenas, limitaciones de transporte), para evaluar su impacto sobre la propagación de la enfermedad.

#### 5. Visualización Interactiva:

- Se desarrollará la **herramienta visual interactiva Epiflow**, que permitirá a los usuarios explorar la **propagación de la enfermedad** y las **rutras de movilidad** entre las ciudades.
- Los usuarios podrán simular y visualizar cómo diferentes intervenciones afectan las rutas de propagación y la evolución temporal de la enfermedad.

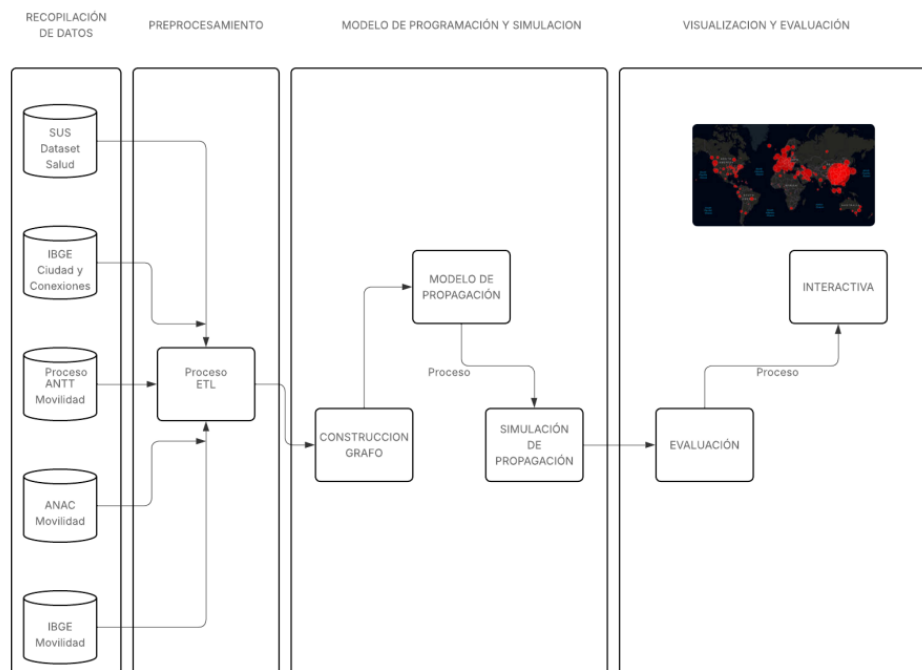


Figura 1: Pipeline de Simulación y Propagación de Enfermedades Infecciosas

### 3.4. Aplicaciones y Relevancia

La plataforma desarrollada será útil para una amplia gama de aplicaciones en el ámbito de la salud pública, incluyendo:

- **Simulación de la propagación de brotes** de enfermedades infecciosas para **prever** áreas de alto riesgo.
- **Evaluación de políticas públicas** de control de enfermedades, como **restricciones de movilidad** o **cuarentenas**.
- **Optimización de la distribución de recursos** médicos, priorizando las áreas más vulnerables a brotes.
- **Asesoramiento a las autoridades sanitarias**, proporcionándoles una herramienta interactiva que facilite la toma de decisiones basadas en datos.

### 3.5. Innovación del Enfoque

La principal innovación de este enfoque radica en la combinación de **modelos metapoblacionales clásicos** con **redes neuronales gráficas (GNN)**, lo que permite **ajustar dinámicamente los parámetros** del modelo en función de los datos de movilidad en tiempo real. Esta metodología no solo proporciona simulaciones más precisas, sino que también permite una **evaluación rápida** y **visualización interactiva** de los resultados, lo que mejora la **toma de decisiones** en salud pública.

### 3.6. Conclusión

El modelo propuesto ofrece una solución innovadora para la **simulación y análisis de la propagación de enfermedades infecciosas** a través de **modelos de movilidad humana y modelos gráficos**. La herramienta visual interactiva proporcionará a los responsables de la salud pública un medio para **explorar escenarios de propagación** y evaluar **políticas de intervención**. Este enfoque mejorará significativamente la capacidad de los tomadores de decisiones para **prevenir brotes** y gestionar **políticas públicas** eficaces para controlar la propagación de enfermedades infecciosas.

A continuación se presenta el **\*\*diagrama del pipeline\*\*** que ilustra las etapas de nuestro modelo, desde la **\*\*recopilación de datos\*\*** hasta la **\*\*visualización interactiva\*\*** de la propagación de la enfermedad.

## Referencias

- Cao, Q., Jiang, R., Yang, C., Fan, Z., Song, X., and Shibasaki, R. (2023). *MepoGNN: Metapopulation Epidemic Forecasting with Graph Neural Networks*, pages 453–468. Springer Nature Switzerland.
- Feng, Z., Zhu, F., Wang, H., Hao, J., Yang, S., Zeng, W., and Qu, H. (2024). Holens: A visual analytics design for higher-order movement modeling and visualization.
- Kang, Y., Gao, S., Liang, Y., Li, M., Rao, J., and Kruse, J. (2020). Multiscale dynamic human mobility flow dataset in the u.s. during the covid-19 epidemic. *Scientific Data*, 7(1):390.
- Lessani, M. N., Li, Z., Jing, F., Qiao, S., Zhang, J., Olatosi, B., and Li, X. (2024). Human mobility and the infectious disease transmission: A systematic review. *Geospatial Information Science*, 27(6):1824–1851.
- Li, G., Chang, B., Zhao, J., Wang, J., He, F., Wang, Y., Xu, T., and Zhou, Z. (2024). Vivian: virtual simulation and visual analysis of epidemic spread data. *Journal of Visualization*, 27:677–694.
- Mason, L., Hicks, B., and Almeida, J. S. (2023). Epivecs: exploring spatiotemporal epidemiological data using cluster embedding and interactive visualization. *Scientific Reports*, 13:21193.
- Oliveira, M., Alencar, A., Oliveira, N., Sales, L., Cunha, A., and Ramos, P. (2023). Epi-flow: a hybrid approach to track infectious disease spread in brazil based on travel data and graph databases. In *Anais do XXXVIII Simpósio Brasileiro de Bancos de Dados*, pages 218–230, Porto Alegre, RS, Brasil. SBC.
- Peng, R., Dong, Y., Li, G., Tian, D., and Shan, G. (2025). Textlens: large language models-powered visual analytics enhancing text clustering. *Journal of Visualization*, 28:625–643.
- Wan, G., Liu, Z., Lau, M. S. Y., Prakash, B. A., and Jin, W. (2024). Epidemiology-aware neural ode with continuous disease transmission graph.

- World Health Organization (2024). Coronavirus disease (covid-19) dashboard. <https://data.who.int/dashboards/covid19/cases>.
- Yang, C., Zhang, Z., Fan, Z., Jiang, R., Chen, Q., Song, X., and Shibasaki, R. (2023). Epi-mob: Interactive visual analytics of citywide human mobility restrictions for epidemic control. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 29(8):3586–3601.
- Zhang, H., Li, P., Zhang, Z., Li, W., Chen, J., Song, X., Shibasaki, R., and Yan, J. (2022). Epidemic versus economic performances of the covid-19 lockdown: A big data driven analysis. *Cities*, 120:103502.