

Universidad de La Habana
Facultad de Matemática y Computación



Título de la tesis

Autor:

Nombre del autor

Tutores:

Nombre del primer tutor

Nombre del segundo tutor

Trabajo de Diploma
presentado en opción al título de
Licenciado en (Matemática o Ciencia de la Computación)

Fecha

github.com/username/repo

Dedicación

Agradecimientos

Agradecimientos

Opinión del tutor

Opiniones de los tutores

Resumen

Resumen en español

Abstract

Resumen en inglés

Índice general

| | |
|---|-----------|
| Introducción | 1 |
| 0.1. Motivación | 2 |
| 0.2. Antecedentes | 2 |
| 0.3. Problema de Investigación | 3 |
| 0.4. Pregunta Científica | 3 |
| 0.5. Objetivos | 4 |
| 0.5.1. Objetivo general | 4 |
| 0.5.2. Objetivos específicos | 4 |
| 0.6. Estructura | 4 |
| 1. Estado del Arte | 5 |
| 1.1. Redes complejas | 5 |
| 1.1.1. Redes sociales | 6 |
| 1.2. Modelos Basados en Agentes | 7 |
| 1.3. Mapas Cognitivos Difusos | 8 |
| 2. Modelación para la simulación de enfermedades transmitidas por vectores | 11 |
| 2.1. Vectores en la naturaleza | 11 |
| 2.1.1. Enfermedades Transmitidas por Vectores (ETV) | 12 |
| 2.2. Dengue | 13 |
| 2.3. Modelación del entorno | 14 |
| 2.3.1. Localizaciones | 14 |
| 2.3.2. Personas | 15 |
| 2.3.3. Vectores | 17 |
| 2.4. Interacción de los agentes con el entorno | 18 |
| 2.4.1. Conceptos (Personas) | 20 |
| 2.4.2. Sentimientos | 22 |
| 2.4.3. Acciones | 23 |
| 3. Detalles de Implementación y Experimentos | 24 |

| | |
|-----------------|----|
| Conclusiones | 25 |
| Recomendaciones | 26 |
| Bibliografía | 27 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| 1.1. Ejemplo de un FCM | 9 |
| 2.1. Algunas enfermedades transmitidas por vectores.(Tercero-Gutiérrez y Olalla-Herbosa 2008) | 12 |
| 2.2. Ejemplo de grafo de relaciones personales generados por el modelo. Personas: 300, probabilidad de arista: 0.05 | 16 |
| 2.3. Ejemplo de grafo de relaciones personales para ilustrar. | 17 |
| 2.4. Ejemplo de grafo que representa a la red de contactos sociales. | 18 |
| 2.5. Esquema que representa el entorno modelado. | 19 |

Ejemplos de código

Introducción

Las enfermedades infecciosas han sido una preocupación constante en todo el mundo debido a su impacto devastador en la salud humana y la sociedad en general. Estas enfermedades son causadas por agentes patógenos, como bacterias, virus, hongos, parásitos y vectores, que pueden transmitirse de una persona a otra.

A lo largo de la historia, las enfermedades infecciosas han desencadenado pandemias y epidemias, cobrando innumerables vidas y afectando la estabilidad de comunidades y naciones. Estas enfermedades pueden tener consecuencias a corto plazo, como enfermedades graves e incluso la muerte, así como impactos a largo plazo, como discapacidades y secuelas. Además del sufrimiento humano, las enfermedades infecciosas también tienen un impacto socioeconómico significativo, afectando la productividad, el desarrollo y los sistemas de atención médica de los países. A pesar de los avances en medicina y prevención, las enfermedades infecciosas continúan representando desafíos persistentes en todo el mundo.

El dengue es una infección transmitida por mosquitos que se presenta en todas las regiones tropicales y subtropicales del planeta. En años recientes, la transmisión ha aumentado de manera predominante en zonas urbanas y semiurbanas y se ha convertido en un importante problema de salud pública. La dinámica de la transmisión de enfermedades infecciosas por vectores es compleja y depende de múltiples factores, incluyendo la biología del vector, la ecología del huésped y el entorno físico.

En cuanto a las estrategias de control, existen diversas opciones que se pueden evaluar mediante la simulación computacional. Una de las estrategias más comunes es el uso de insecticidas, que se aplican en áreas donde los vectores se reproducen y se alimentan. Otra estrategia de control es la implementación de programas de prevención y educación, que buscan reducir la exposición de las personas al vector y la enfermedad. Por ejemplo, se pueden distribuir repelentes de insectos y mosquiteros para prevenir las picaduras de mosquitos, y se pueden implementar campañas de educación para promover prácticas seguras de eliminación de criaderos de mosquitos. (Gubler y Clark 1995)

La simulación computacional es una herramienta esencial para estudiar la dinámica y el control de patógenos transmitidos por vectores. Al utilizar diferentes modelos y técnicas de simulación, se pueden explorar diferentes escenarios y estrategias de

control para prevenir y mitigar la propagación de enfermedades infecciosas. Estas simulaciones pueden ser una herramienta muy valiosa para los responsables de la toma de decisiones en salud pública, ya que pueden ayudar a evaluar la efectividad de diferentes medidas de control y a prever el impacto de una enfermedad infecciosa (Epstein 2008), como es el caso del dengue en nuestra población.

0.1. Motivación

Enfrentarse a una epidemia presenta una serie de desafíos significativos que requieren una respuesta rápida y coordinada. Estos desafíos pueden variar según la naturaleza del patógeno, la magnitud de la epidemia y el contexto socioeconómico en el que se produce, pero siempre el principal desafío es la pérdida de vidas humanas. Otro de los principales problemas que genera una epidemia es el impacto económico y social. Las epidemias pueden tener un impacto significativo en la economía y el tejido social de las comunidades afectadas. Tanto las medidas de control, como los gastos médicos podrían traer consigo el inicio de una crisis económica.

Las enfermedades pueden propagarse rápidamente y colapsar los sistemas de atención médica. La capacidad de transmisión del patógeno puede dificultar la contención y el control eficaz de la enfermedad, especialmente si no se toman medidas preventivas adecuadas.

Enfrentar una epidemia requiere una sólida coordinación y colaboración entre diferentes entidades, como agencias de salud pública, gobiernos, organizaciones no gubernamentales y comunidades. La falta de coordinación puede dificultar la implementación de medidas de control y generar confusión entre la población.

Teniendo en cuenta estos desafíos, sería de gran importancia tener una herramienta computacional que simule estos escenarios para así ayudar a la toma de decisiones, atendiendo al conocimiento que esta podría brindar.

0.2. Antecedentes

La experiencia del Grupo de Biomatemática de la facultad de Matemática y Computación en el trabajo con modelos epidemiológicos poblacionales y la estimación y ajuste de sus parámetros, avala la importancia y necesidad de contar con herramientas computacional que simulen y resuelvan los problemas inherentes a la modelación, solución, estimación y predicción.

En relación a esta temática existen trabajos como *Redes Complejas en Epidemiología*. Aplicaciones a modelos de VIH y Dengue" su autora es Glenda Beatriz Rodríguez

García, para optar por el título de licenciatura en Matemática, y de tutora: Dra. Aymée Marrero Severo (2016). En este se presentan conceptos sobre la teoría de redes complejas y se analiza su aplicación al caso de epidemias de Dengue y VIH. Además, utiliza un sistema de ecuaciones diferenciales para mostrar una comparativa con el resultado obtenido por el modelo de redes complejas.

0.3. Problema de Investigación

La simulación computacional es una herramienta poderosa para modelar y comprender la dinámica de la transmisión de patógenos por vectores. Al utilizar la simulación, se pueden explorar diferentes escenarios y estrategias de control para prevenir y mitigar la propagación de enfermedades. (Ferguson et al. 2006)

Existen diferentes tipos de modelos que se pueden utilizar para estudiar la dinámica de la transmisión de enfermedades infecciosas por vectores. Uno de los modelos más comunes es el SIR (Kermack y McKendrick 1927), que divide la población en tres grupos: susceptibles, infectados y recuperados. El modelo SIR se utiliza para entender cómo se propaga una enfermedad infecciosa a través de una población y cómo la enfermedad puede ser controlada. Otros, incluyen modelos basados en agentes, que simulan el comportamiento individual de los vectores y los huéspedes, y modelos de redes, que modelan las interacciones entre los vectores, los huéspedes y el entorno. Cada uno de estos métodos ofrece distintos recursos para enfrentar el proceso de simulación. (Ferguson et al. 2006) (Balcan et al. 2009)

Teniendo en cuenta los diferentes métodos que existen, la problemática de la presente investigación sería la modelación de una simulación para la dinámica y el control de patógenos transmitidos por vectores.

0.4. Pregunta Científica

Por lo analizado durante la investigación se plantea la pregunta científica: ¿es posible implementar una herramienta de simulación, distinta a los modelos clásicos de ecuaciones diferenciales, la cual modele la propagación de una enfermedad transmitida por vectores?

0.5. Objetivos

0.5.1. Objetivo general

Implementar un modelo que, usando redes complejas, simule la dinámica de las personas y los vectores en el medio, desarrollando una herramienta de trabajo para el mismo.

0.5.2. Objetivos específicos

- Estudiar la bibliografía relacionada.
- Estudiar y comparar los modelos que existen para la simulaciones de epidemias que se adapten a los requerimientos establecidos.
- Diseñar un modelo para la simulación que represente a las personas como agentes.
- Implementar una aplicación que permita simular diferentes escenarios del modelo desarrollado.
- Validar el modelo implementado con modelos clásicos.

0.6. Estructura

El documento se encuentra estructurado en tres capítulos. En el Capítulo 1 se realiza un estudio sobre el marco teórico conceptual del problema en cuestión, haciendo énfasis en las Redes Sociales, la Modelación Basada en Agentes y los Mapas Cognitivos Difusos. El Capítulo 2 aborda sobre la modelación de los agentes y el entorno, argumentando el mapa cognitivo perteneciente a los agentes. En el Capítulo 3 se especifican los aspectos técnicos de la implementación del modelo y se lleva a cabo un análisis del valor de la solución desarrollada mediante experimentos. Finalmente se presentan las Conclusiones, que resume los hallazgos claves y los puntos principales, dando respuesta a los objetivos según los resultados obtenidos.

Capítulo 1

Estado del Arte

Una epidemia es la aparición en un período de tiempo corto de una enfermedad infecciosa en una población. Cuando la enfermedad persiste en la población después de un tiempo determinado, se considera endemia. Para los casos en que la enfermedad abarca no solo períodos de tiempo largos, sino que además está difundida por una región geográfica grande, se denomina pandemia.(Morens et al. 2004)

1.1. Redes complejas

En el contexto de la teoría de redes, una red compleja se refiere a una red (grafo) que posee ciertas características topológicas no triviales que no ocurren en redes simples.

Newman en (Newman 2003) especifica los conceptos y propiedades de estas, en el cual expresan que las redes complejas son estructuras compuestas por un conjunto de elementos interconectados, donde las interacciones entre esos elementos generan propiedades emergentes a nivel global.

Propiedades de las redes complejas:

1. Distribución de grado libre: Las redes complejas tienden a tener una distribución de grado libre, lo que significa que el número de conexiones que tienen los nodos sigue una ley de potencia. Esto implica que existen pocos nodos con un grado muy alto (llamados "hubs") y muchos nodos con un grado bajo. Esta propiedad refleja la heterogeneidad en la conectividad de los nodos.
2. Mundo pequeño: Las redes complejas a menudo exhiben la propiedad del mundo pequeño, lo que significa que la distancia promedio entre dos nodos elegidos al azar es relativamente corta. En otras palabras, los caminos entre nodos distantes

suelen ser sorprendentemente cortos. Esta propiedad facilita la propagación de información o influencia rápidamente a través de la red.

3. **Clustering o agrupamiento:** Las redes complejas tienden a mostrar agrupamiento o clustering significativo. Esto significa que los nodos tienden a formar comunidades o grupos densamente conectados entre sí. Dentro de una comunidad, los nodos están más interconectados que con nodos fuera de la comunidad. El agrupamiento refleja la tendencia natural de las entidades a formar subgrupos o comunidades en la vida real.
4. **Centralidad:** La centralidad de un nodo en una red compleja se refiere a su importancia relativa en términos de conexiones o influencia. Hay diferentes medidas de centralidad, como la centralidad de grado, la centralidad de cercanía y la centralidad de intermediación. Los nodos con alta centralidad suelen desempeñar un papel crucial en la estructura y la dinámica de la red.
5. **Propagación y difusión:** Las redes complejas influyen en cómo se propaga la información, los contagios o los flujos a través de sus conexiones. Esto tiene aplicaciones en el estudio de la propagación de enfermedades, la difusión de información en las redes sociales, la viralidad de contenido en línea, entre otros fenómenos.

Los ejemplos de redes complejas son numerosos en la actualidad; el cerebro es una red de neuronas conectadas por medio de la sinapsis, una organización es una red de personas con diversos tipos de conexiones entre ellas, la economía mundial es una red formada por las economías nacionales, que a su vez son redes de mercados, y éstos son redes de productores y consumidores que interactúan, las redes de transporte público, como las redes de autobuses o trenes en una ciudad, se pueden modelar como redes complejas; siendo los nodos las paradas y las aristas representan las rutas o conexiones entre ellas.

1.1.1. Redes sociales

En el contexto de las redes sociales, los individuos o entidades son los elementos de la red, y las interacciones o conexiones entre ellos forman las aristas. Estas redes exhiben varias propiedades típicas de las redes complejas, como la distribución de grado libre, donde algunos nodos tienen muchos enlaces mientras que otros tienen pocos; la presencia de comunidades o grupos de nodos altamente interconectados; y la presencia de nodos influyentes o centrales que desempeñan un papel importante en la red. (Newman 2003)

Este tipo de redes complejas se ha utilizado para simular la propagación de enfermedades y el control que se puede realizar para evitar su esparcimiento de muchas maneras en la actualidad. En (Eubank et al. 2004) se realiza una simulación en la cual se crea una red social dividida en dos grupos, las personas y los lugares, esta red se puede ver como un grafo bipartito:

$$\begin{aligned} & \text{(Sea } p \subset \text{Personas y } l \subset \text{Localizaciones)} \\ G(V, E): p \in V, l \in E : & \text{ si } a, b \in V, \langle a, b \rangle \in E, x = w(a, b) \Rightarrow a \text{ está en el} \\ & \text{instante de tiempo } x \text{ en } b \end{aligned}$$

Esta manera de modelar el problema de cómo representar personas y localizaciones en las simulaciones se considera interesante pues muchas enfermedades se transmiten mediante la interacción con una persona infectada, actuando como un intermediario en el proceso de contagio. Este grafo no es dinámico, es decir, mantiene su estado inicial de nodos y aristas. Un grafo dinámico se acercaría más al comportamiento que tienen las personas en la sociedad, ya que todos los días no nos encontramos en el mismo lugar a la misma hora.

1.2. Modelos Basados en Agentes

La simulación basada en agentes (ABM por sus siglas en inglés) es un enfoque de modelación computacional que se utiliza para simular sistemas complejos, donde los agentes individuales interactúan entre sí y con su entorno. Cada agente es una entidad autónoma con su propio comportamiento, objetivos y reglas de interacción. El estado interno, su percepción del entorno y las interacciones con otros agentes es lo que define la decisión o acción a realizar por estos. (Macal y North 2010)

Estructura de una modelación basada en agentes:

1. Conjunto de agentes, sus atributos y comportamientos posibles.
2. Conjunto de las relaciones entre agentes y los métodos de interacciones.
3. El entorno en el que interactúan.

En un ABM, se busca comprender cómo emergen los patrones y las dinámicas a nivel colectivo a partir de las interacciones de los agentes individuales. Según Nicholas R. Jennings en (Jennings 2000) la definición de agentes está dada por ciertos puntos:

1. Se encuentran situados en un entorno: reciben una instancia del estado del medio y actúan en este.

2. Tienen propósitos específicos: poseen objetivos particulares a lograr.
3. Autonomía: tienen control sobre sus estados internos y sobre sus propios comportamientos.
4. Capacidad de presentar comportamientos flexibles ante las soluciones de problemas siempre siguiendo sus objetivos: necesitan ser capaces de actuar en consecuencia con lo que ocurre para cambiarlo o mantenerlo y también actuar anticipadamente para esto

Con este modelo es posible simular diferentes escenarios; la convivencia de animales en un medio, con el objetivo de observar como se modifican las poblaciones del mismo se podría simular usando agentes; en este caso los animales se tratarían como los agentes del modelo; también para la propagación de epidemias (Bagni et al. 2002), simulacros de incendios o atentados en centros de trabajo; en ambos casos, las personas serían tratadas como los agentes de la simulación.

En (Bissett et al. 2021) además de utilizar la red social, se basan en agentes para simular. En su caso las personas son agentes que poseen cierto grado de infección, cierta probabilidad de transmitir, tienen cierta movilidad, pero por lo que se interpreta estos agentes no tienen la capacidad de decidir en un instante de tiempo que hacer exactamente, sino que el grafo ya está definido de tal forma que estos se mueven por lo que en la red indica. Pero, ¿qué sucedería si las personas tuvieran la posibilidad de decidir; según lo que perciben del medio, según sus sentimientos; qué hacer en el instante de tiempo en que se encuentran? En teoría, toda persona teniendo en cuenta el contexto social y su presente, tiene la capacidad de realizar o no una acción determinada, por lo cual, para la pregunta formulada anteriormente, se interpreta que de implementarse así, un agente se comportaría similar a una persona.

Surge otra interrogante, ¿cómo lograr que los agentes se comporten de una forma u otra según lo que perciben? Una manera de darle respuesta a esta pregunta es mediante Mapas Cognitivos Difusos (FCM por sus siglas en inglés)

1.3. Mapas Cognitivos Difusos

Bart Kosko en (Kosko 1986) brinda un concepto de mapa cognitivo difuso, argumenta que son digrafos en los cuales los nodos son variables, que representan conceptos y las aristas son conexiones entre estos. Sea G digrafo que representa al FCM, sea la arista:

$\langle a, b \rangle \in G$ si $w(a, b) > 0$ ($w(a, b) < 0$) \Rightarrow El concepto que representa el nodo a influye positivamente (negativamente) en el concepto que representa el nodo b . (Los pesos de las aristas son valores desde $[-1, 1]$)

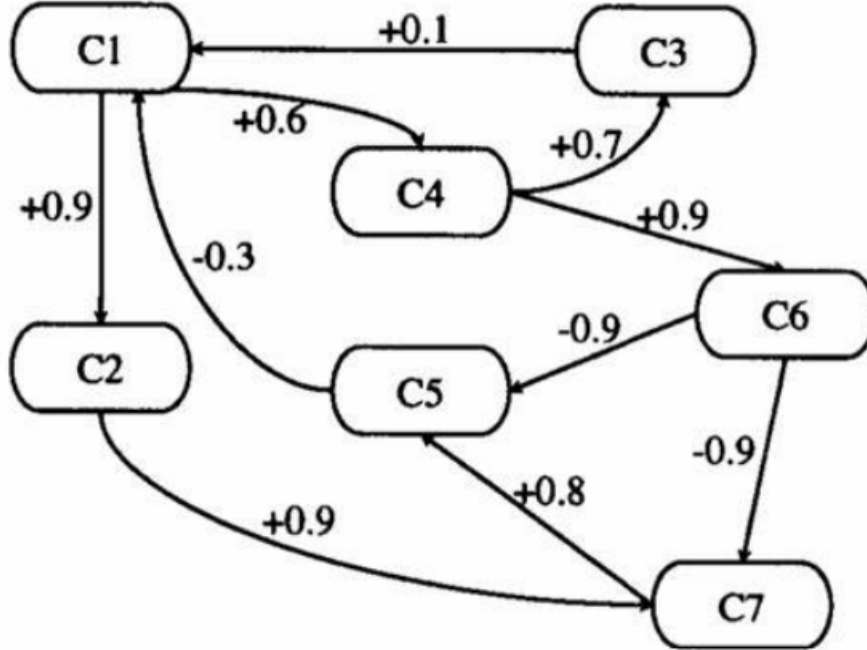


Figura 1.1: Ejemplo de un FCM

En esta imagen los C_i hacen referencia al concepto i del agente. El valor de los conceptos de los agentes se calcula en el momento en que este deba realizar una acción utilizando la siguiente función:

$$X_i(t+1) = F(X_i(t) + \sum_{j=1}^n (X_j(t) \times w_{j,i}))$$

donde $X_i(t)$ es el valor del i -ésimo concepto en el t -ésimo instante de tiempo, $i, j = 1, 2, \dots, n$, donde n es el número de conceptos, $w(i, j)$ es el peso que representa la relación que posee el concepto i con el concepto j y $F(x)$ es la función de transformación sigmoideal que normaliza los valores conceptuales al rango $[0, 1]$. (Poczeta et al. 2020)

Existen varias formas y ejemplos en los cuales se puede utilizar un FCM, Nachazel en (Nachazel 2021) explica una nueva modificación a los FCM para la autonomía de decisión de los agentes. Propone dividir los conceptos en 3 clases diferentes; necesidades, actividades y estados; para así agregar características que ayuden a la toma de decisiones y las necesidades internas que puede tener un agente. Es una visión

sorprendente sobre en que se basa una entidad o agente para la toma de decisiones o realizar una acción. Sin embargo se opina que utilizando otras clases quizás se adapte mejor este FCM al necesitado: perspectiva, sentimientos, acciones.

Con estas tres nuevas clases se podría utilizar el conocimiento que tiene un agente sobre el medio que lo rodea (**perspectiva**) y como este se siente con respecto a esto (**sentimientos**) para así decidir sobre que acción final realizaría (**acciones**).

Al enlazar los conceptos y modelos antes vistos, se obtendría un entorno en el cual convivirían los agentes, teniendo o no algún tipo de relación entre ellos (Red Social); en este existirían localidades a las cuales los mismos podrían acceder (Red Social) y cada agente poseería su propio FCM de percepción, sentimientos y acciones para elegir que realizar en cada momento.

Capítulo 2

Modelación para la simulación de enfermedades transmitidas por vectores

2.1. Vectores en la naturaleza

Un vector es un organismo vivo, como un insecto o artrópodo, que puede transmitir un agente infeccioso, como un virus, una bacteria o un parásito, de un huésped infectado a un huésped susceptible. Los vectores pueden actuar como intermediarios en la transmisión de enfermedades, ya sea mecánicamente, a través de la contaminación de alimentos o superficies con el agente infeccioso, o biológicamente, cuando el agente infeccioso se replica y multiplica dentro del vector antes de ser transmitido a un nuevo huésped. Los vectores son una parte integral de la epidemiología de muchas enfermedades infecciosas y desempeñan un papel crucial en su mantenimiento y propagación.(Reisen 2010)

Según la OMS, las enfermedades airborne (arthropod-borne) representan 17 por ciento del total de las enfermedades infecciosas en el mundo, con 1,000 millones de casos y un millón de defunciones anuales (WHO 2020). Los vectores biológicos más comunes son los insectos hematófagos que al alimentarse de la sangre de un portador infectado, ingieren microorganismos patógenos que posteriormente inoculan a otro individuo.

Características generales de los vectores:(WHO 2020)

1. Especies específicas: Los vectores suelen ser especies específicas de insectos, artrópodos u otros organismos. Por ejemplo, los mosquitos, las garrapatas, las pulgas y los flebótomos son ejemplos comunes de vectores.

2. Capacidad de transmitir enfermedades: Los vectores tienen la capacidad de transmitir agentes patógenos, como virus, bacterias o parásitos, de un huésped infectado a un huésped susceptible. Esto puede ocurrir a través de la picadura o el contacto con el vector.
3. Dependencia de los huéspedes: Los vectores dependen de la sangre u otros recursos de sus huéspedes para alimentarse y reproducirse. Por lo tanto, su presencia y actividad están estrechamente relacionadas con la disponibilidad de los huéspedes adecuados.

2.1.1. Enfermedades Transmitidas por Vectores (ETV)

Entre las ETV que han aumentado en las últimas décadas están el paludismo o malaria, la fiebre hemorrágica por dengue, la esquistosomiasis, la tripanosomiasis americana o enfermedad de Chagas, la tripanosomiasis africana o enfermedad del sueño, la leishmaniasis, la fiebre amarilla, la encefalitis japonesa, la fiebre por zika y la fiebre por chikungunya. Otras ETV menos frecuentes son la borreliosis o enfermedad de Lyme y la enfermedad por el virus del oeste del Nilo. (Torres-Castro et al. 2020)

| ENFERMEDAD | PARASITO | VECTOR |
|---------------------------|--|---|
| Dengue | Flavivirus del dengue | Mosquito <i>Aedes aegypti</i> |
| Esquistosomiasis | <i>Schistosoma mansoni</i> , <i>S. japonicum</i> <i>S. haematobium</i> | Caracol de agua dulce |
| Fiebre amarilla | Arbovirus del género <i>Flavivirus</i> | Mosquito <i>Aedes aegypti</i> |
| Filariasis | <i>Wuchereria bancrofti</i> | Mosquitos del género <i>Aedes</i> , <i>Anopheles</i> , <i>Culex</i> y <i>Mansonia</i> |
| Oncocercosis | <i>Onchocerca volvulus</i> | Moscas del género <i>Simulium</i> |
| Tripanosomiasis africana | <i>Trypanosoma brucei gambiense</i> y <i>Trypanosoma brucei rhodesiense</i> | Mosca tse-tse |
| Tripanosomiasis americana | <i>Trypanosoma cruzi</i> | Chinche triatoma |
| Paludismo | <i>Plasmodium falciparum</i> , <i>P. vivax</i> , <i>P. ovale</i> y <i>P. malariae</i> | Mosquito <i>Anopheles</i> spp. |

Figura 2.1: Algunas enfermedades transmitidas por vectores. (Tercero-Gutiérrez y Olalla-Herbosa 2008)

La distribución de las ETV está vinculada a una serie de factores complejos de naturaleza demográfica, ecológica, medioambiental y social. Estos factores incluyen:

1. El fenómeno del calentamiento global y el consiguiente cambio climático, que permite la adaptación de los vectores a nuevas altitudes y la propagación de patógenos en regiones previamente no afectadas.

2. La sobrepoblación y el hacinamiento en áreas específicas, lo cual propicia un aumento en la presencia de vectores y hospederos susceptibles, como perros y gatos.
3. La densidad de población de los artrópodos vectores y la diversidad de especies presentes en un área determinada.
4. La falta de medidas adecuadas de higiene a nivel personal, en viviendas y en comunidades.
5. El incremento en la frecuencia y distancia de los viajes internacionales.
6. La existencia de marginación, pobreza y urbanización descontrolada.

Actualmente, la enfermedad transmitida por vector con mayor crecimiento mundial es el dengue. Al igual que el virus del dengue, el del Zika, el chikungunya y la fiebre amarilla son transmitidos por los mosquitos *Aedes aegypti* y *Aedes albopictus*. Más de 3900 millones de personas en más de 129 países corren el riesgo de contraer dengue, y se estima que cada año se registran 96 millones de casos sintomáticos y 40 000 muertes. (WHO 2020)

2.2. Dengue

El dengue es una enfermedad viral transmitida por mosquitos que representa un desafío significativo para la salud pública a nivel mundial. Esta enfermedad se encuentra principalmente en regiones tropicales y subtropicales, pero su alcance se ha extendido durante las últimas décadas, llegando a afectar a más de 100 países. El complejo del Dengue está formado por cuatro serotipos: dengue1, dengue2, dengue3 y dengue4. La infección humana por un serotipo produce inmunidad para toda la vida contra la reinfección por ese serotipo, pero el individuo queda susceptible a los otros tres. (Simmons et al. 2012)

Una vez una persona es picada por un mosquito infectado, se produce un período de incubación en esta, que puede durar de 5 a 7 días, luego de esto aparecen los primeros síntomas. El humano se encuentra enfermo aproximadamente durante 7 o 15 días. En el momento en el que surgen los primeros síntomas comienza el período crítico de transmisión. Si en este intervalo de tiempo un mosquito pica a esa persona, entonces tiene una probabilidad alta de adquirir la enfermedad y luego de 8 a 12 días el virus se aloja en las glándulas salivales del mosquito y es en esta etapa en que el mosquito es capaz de transmitir la enfermedad. (WHO 2023)

Una de las características más preocupantes del Dengue es su capacidad para causar una amplia gama de síntomas, desde una fiebre leve hasta formas más preocupantes que pueden poner en peligro la vida. La forma grave de la enfermedad, conocida como fiebre hemorrágica del dengue, puede producir hemorragias internas, disfunción orgánica y shock. Esta forma afecta principalmente a niños pequeños, adultos mayores y personas con sistemas inmunológicos debilitados.

Síntomas del Dengue:(WHO 2023)

1. Fiebre alta (40°C).
2. Dolores de cabeza.
3. Dolor detrás de los ojos.
4. Náuseas
5. Vómitos
6. Rash

El mosquito *Aedes aegypti* es el vector del Dengue. El ciclo de vida de un mosquito es aproximadamente entre 4 y 8 semanas y ocurre en varias etapas, huevo, larva, pupa y adulto. Los que transmiten la enfermedad son los mosquitos hembras adultos. Estas necesitan de sangre para desarrollar los huevos y pueden volar hasta 3 kilómetros con el objetivo de encontrar un lugar para ponerlos, aunque no se espera que vuelen más de 100 metros del sitio donde viven.

2.3. Modelación del entorno

Lo primero que se debe crear y modelar para simular como ocurre la propagación de enfermedades es el entorno en que ocurrirá la misma. La idea de este trabajo es lograr representar la realidad de la sociedad y para esto se entiende que existen parámetros a desarrollar: las relaciones personales, los lugares y el comportamiento de las personas.

2.3.1. Localizaciones

En la actualidad la mayoría de las personas tienen un programa de vida definido, es decir, una persona x tiene una vivienda, un centro de trabajo y otros lugares a los

que asiste por determinadas circunstancias; por lo que para representar la sociedad, es necesario según se entiende, modelar estos lugares.

Para esto, los lugares son considerados un objeto en nuestro proyecto. Se entiende por lugar una localización en la cual pueden asistir personas y vectores y además este puede brindar cierto recurso. Por ejemplo: ¿cómo se representaría un mercado en nuestra simulación?, un mercado posee una capacidad para albergar personas y vectores y además brinda la posibilidad de obtener comida, aseo, entre otros.

Localizaciones relevantes a representar:

1. Casas: representa un hogar familiar.
2. Hospitales: indica un centro de atención médica.
3. Centros de trabajo: hace referencia a todo lugar laboral, pero no significa que si una persona está en este, se encuentra trabajando, por ejemplo: en una escuela (centro de trabajo) hay personas que no están trabajando como los niños.
4. Mercados.

Este tipo de localizaciones nos permite abarcar toda construcción en la que pueden relacionarse las personas, pues el tipo de lugar "*Centro de Trabajo*" sirve de comodín en nuestra simulación.

2.3.2. Personas

Una de las herramientas conocidas para describir relaciones entre agentes son los grafos (Newman 2003). Un grafo es un par ordenado $G = (V, E)$ donde V es un conjunto no vacío de nodos y E es un conjunto de pares no ordenados de aristas.

$G = (V, E)$ tal que:

1. $V = \{ v_1, v_2, v_3, \dots, v_n \}$ es un conjunto finito de vértices.
2. $E = \{(v_i, v_j) | v_i, v_j \in V\}$ es un conjunto de pares no ordenados de vértices que representan las aristas del grafo.

En nuestro proyecto se construye un grafo que representa la relación ser familia y la relación conocidos, brindando la posibilidad de escoger la probabilidad con la que se genere una arista entre dos nodos y la cantidad de nodos a crear. En este, un nodo

v_i representa a la persona i de la simulación y una arista (v_i, v_j) simboliza, o bien la relación $i \rightarrow j$ son familiares, o son conocidos, es decir no existe un tipo de arista para cada tipo de relación. ¿Cómo se identifica entonces si la arista (v_i, v_j) representa la relación ser familia o la relación conocidos?

Para esto se realiza un proceso estocástico que ocurre una sola vez (al inicio de la simulación), el cual consiste en escoger de manera aleatoria el conjunto C que se define a continuación.

Sea $G = (V, E)$ un grafo de nuestra simulación.

Sea $H \subset V$ tal que $v_i \in H \Leftrightarrow \forall v_j \in H, (v_i, v_j) \in E$

Sea $C = \{H_1, H_2, \dots, H_l\}, \forall i H_i \subset V$ tal que si $v_j \in H_i \Rightarrow v_j \notin H_k \forall k \neq i$

Teniendo esto en cuenta entonces las relaciones están definidas de la siguiente forma:

$\forall i, j (v_i, v_j) \in E$ representa la relación ser familia $\Leftrightarrow \exists k$ tal que $v_i, v_j \in H_k, H_k \in C$.
Si $v_i \in H_k, v_j \notin H_k, H_k \in C$ y $\exists (v_i, v_j) \Rightarrow$ la arista (v_i, v_j) representa la relación ser conocidos.

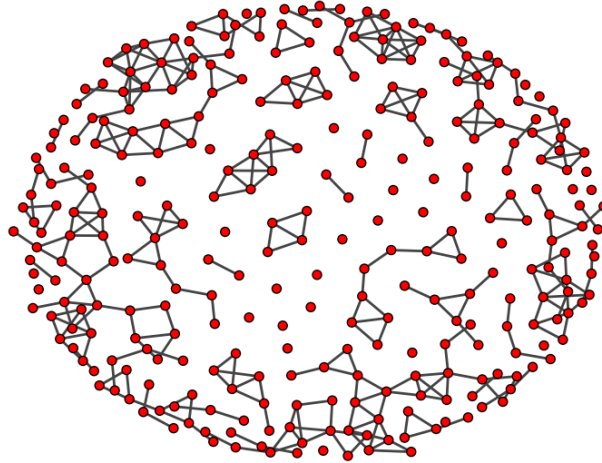


Figura 2.2: Ejemplo de grafo de relaciones personales generados por el modelo.
Personas: 300, probabilidad de arista: 0.05

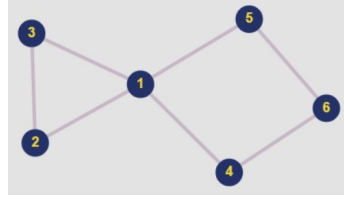


Figura 2.3: Ejemplo de grafo de relaciones personales para ilustrar.

En la figura 2.3 se observa un posible grafo generado. En este grafo los posibles conjuntos H serían: $H_1 = (1,2)$; $H_2 = (1,3)$; $H_3 = (2,3)$; $H_4 = (1,2,3)$; $H_5 = (1,5)$; $H_6 = (1,4)$; $H_7 = (4,6)$; $H_8 = (5,6)$ y por último tantos conjuntos H como nodos haya, es decir todos los posibles cliques del grafo. De estos conjuntos se seleccionarían aleatoriamente algunos para formar el conjunto C ; por ejemplo $C = \{H_4, H_7, H_{15}\}$; y los nodos que estan en los $H_i \in C$ serían considerados familias entre ellos.

Las personas, en el curso de la realización de sus actividades diarias (como el trabajo, el estudio o las compras), se desplazan entre varios lugares, exponiéndose a agentes infecciosos dentro de estos lugares y transportando las enfermedades. Para lograr representar y modelar estos procesos se genera una red de contactos sociales que puede ser vista como un grafo bipartito, en el cual el conjunto A está compuesto por todas las personas de la simulación y el conjunto B por todas las localizaciones. Las aristas en este grafo son dirigidas y representan el lugar en donde se encuentra la persona.

Sea $G = (V, E)$ grafo dirigido. $\forall i, j$ si $(v_i, v_j) \in E \Rightarrow$ la persona v_i se encuentra en el lugar v_j

El grafo definido anteriormente es un grafo dinámico, es decir este varía en dependencia del lugar en donde se encuentre una persona, pues al decidir un agente ir a otro lugar, se elimina la arista que antes este tenía en el grafo y se añade la nueva arista, la cual representa el lugar en donde se encuentra en el momento. (Los vértices que representan personas tienen *outdegree* igual a 1)

2.3.3. Vectores

Los vectores son seres vivos al igual que las personas, pero a diferencia de estas estos poseen menos movilidad que las personas. Para la representación de los vectores en el modelo no se tiene en cuenta la relación que poseen entre ellos pues se entiende que es suficiente con las relaciones de las personas para lograr simular la propagación

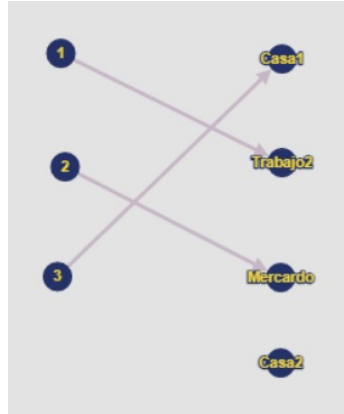


Figura 2.4: Ejemplo de grafo que representa a la red de contactos sociales.

de una enfermedad.

Los mosquitos como bien se mencionó anteriormente se establecen en un lugar y poco o nada se mueven de sus alrededores, por tanto, se decidió que los vectores en nuestra simulación no tuviesen la capacidad de moverse por las localizaciones como las personas ya que esto nos acerca más a lo que ocurre en la realidad.

Los vectores se modelan con la posibilidad de morder y de infectarse. Estos según mecanismos estocástico deciden si picar o no y teniendo en cuenta el nivel de infección de la persona y la susceptibilidad del mismo este se infecta o no. También poseen un parámetro que representa la probabilidad de infectarse debido a una mordida, mientras más alto más probable que este se infecte si pica o muerde a una persona enferma.

En la figura 2.4 se observa como se encuentra modelado el entorno de la simulación. Existen unos agentes que son las personas y los vectores, los cuales poseen ciertas características y estos interactúan con las localizaciones para cumplir sus propósitos; el de las personas trabajar y socializar y el de los vectores alimentarse, logrando así acercarnos a un modelo que representa de forma precisa como se propaga un enfermedad transmitida por vectores.

2.4. Interacción de los agentes con el entorno

Una vez diseñado el entorno y los agentes que conviven en el mismo, se abre paso al siguiente aspecto: como interactúan entre sí. La interacción entre los agentes y su medio es esencial para comprender cómo se desarrollará y evolucionará el sistema en cuestión.

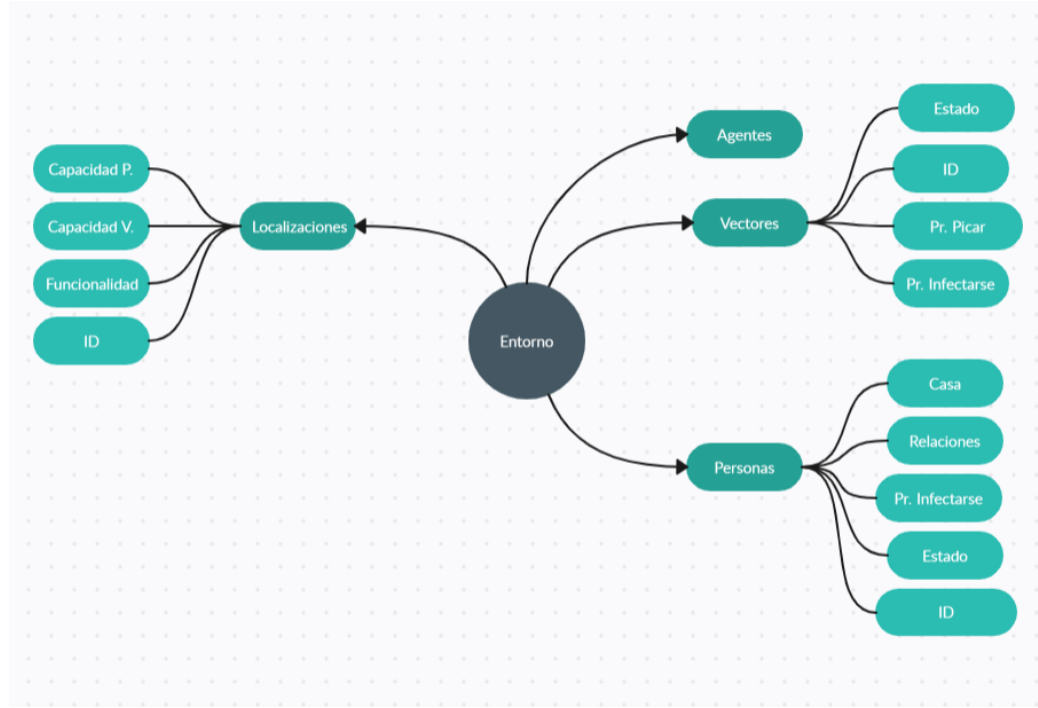


Figura 2.5: Esquema que representa el entorno modelado.

Existen muchas formas de desarrollar las interacciones, dependiendo del contexto y los objetivos establecidos para los agentes. Pueden ser directas, donde los agentes interactúan entre sí de manera mutuamente perceptible, indirectas, donde los agentes influyen en el entorno, y a su vez, el entorno afecta a la forma en que estos se comportan y un híbrido en el que los agentes según sus decisiones afectan al medio y a otros agentes, y también, el entorno los afecta.

Las interacciones pueden estar basadas en reglas predefinidas, donde se establecen normas, objetivos y una serie de comportamientos específicos, o pueden ser adaptativas, donde los agentes aprenden a medida que intercambian con el entorno, obteniendo retroalimentación del mismo, para modificar su comportamiento.

Una herramienta computacional que brinda la posibilidad de crear agentes con cierta inteligencia para manejar sus decisiones son los Mapas Cognitivos Difusos (FCM). Para el diseño de un *FCM* es necesario definir los conceptos que este agrupará, así como las categorías de conceptos.

¿Qué son los conjuntos difusos? Zadeh en (Zadeh 1965) da respuesta a esta interrogante de la siguiente forma.

Sea X un espacio de puntos en los que los elementos de X son x . $X = \{x\}$

Un conjunto difuso A en X es caracterizado por una función de membresía $f_A(x)$ que

asocia a cada punto en X un valor real en el intervalo $[0, 1]$ con el valor de $f_A(x)$ en x representando el grado de membresía de x en A , tal que mientras más cerca el valor de $f_A(x)$ a la unidad más alto es el grado de membresía de x en A . Pongamos un ejemplo representado en (Zadeh 1965).

Sea X el conjunto de los números reales R y sea A un conjunto difuso de los números que son mucho mayores que 1. La función $f_A(X)$ podría tener ciertos valores representativos como: $f_A(0) = 0$, $f_A(1) = 0$, $f_A(5) = 0,01$, $f_A(10) = 0,2$, $f_A(100) = 0,95$, $f_A(500) = 1$.

Es importante notar que cuando el conjunto X es un conjunto contable la función de membresía es parecida a una función de probabilidad (o parecido a la función de densidad cuando X es continuo), evidentemente existen diferencias entre estos conceptos las cuales son especificadas por Zadeh en (Zadeh 1965).

En el Capítulo "Estado del Arte" se realiza un acercamiento a la posibilidad de crear un *FCM* con tres clases de conceptos; *Perspectiva*, *Sentimientos* y *Acciones*. Cada clase tiene una serie de conceptos que posibilitan la interacción entre clases. Al separar los conceptos se comienza a ver el grafo del *FCM* como un grafo bipartito, en el cual el conjunto A se encuentra formado por los conceptos de las clases *Perspectiva* y *Acciones* y el conjunto B por la clase *Sentimientos*. Entonces surge una interrogante, ¿cuál sería el flujo a seguir de este *FCM* para que los agentes decidieran una acción u otra?.

La idea es la siguiente, un agente percibe un estado del entorno, este estado, provoca un sentimiento en el agente y, a su vez, este sentimiento provoca una acción.

$$Perspectiva \rightarrow Sentimientos \rightarrow Acciones$$

A medida que va cambiando el entorno, va cambiando la perspectiva del agente esta afecta a los sentimientos del mismo y con esto cambia la probabilidad de efectuar una acción u otra. Por tanto, el tipo de relación utilizada en este *FCM* es híbrida, cada pequeño cambio, ya sea, en el entorno, o en el mapa cognitivo difuso de un agente, afecta al *FCM* de los agentes restantes.

2.4.1. Conceptos (Personas)

Perspectiva

Para la sección de los conceptos de percepción se observa que una idea útil es que, para cada concepto, crear su contrapuesto como concepto, por ejemplo, si se definiese el concepto "*cercaníadehospital*", entonces sería útil definir el concepto "*lejaníadehospital*" pues las posibles acciones a ejecutar se beneficiarían por uno

y se perjudicarían por el otro, añadiendo facilidad a la decisión del agente.

Conceptos definidos para la categoría Perspectiva:

- Personas enfermas alta. (1.4)
- Personas enfermas baja. (1.4)
- Comida alta. (1.5)
- Comida baja. (1.5)
- Energía alta. (3)
- Energía baja. (3)
- Dinero alto. (1.5)
- Dinero bajo. (1.5)
- Enfermedad alta. (3.2)
- Enfermedad baja. (3.2)

Cada concepto en esta categoría, tiene un parámetro que representa cuan grande es el intervalo que se considera para darle un valor en la *fuzziificación* entre (0,1) al concepto (el número que se encuentra entre paréntesis al lado del concepto), en caso de que sea menor o mayor a los límites del intervalo, su valor final es 0 o 1 respectivamente, pero, ¿por qué se realiza este procedimiento?

La idea de implementar de esta forma esta categoría es para *fuzziificar* teniendo en cuenta lo que se percibe del entorno. El valor de este parámetro por concepto nunca cambia, entonces surge la interrogante siguiente: ¿cómo modelar que la perspectiva del entorno varía? Este valor pasa por un proceso en el cual se toman variables que si cambian en el entorno y se utiliza el mismo para *fuzziificar* el valor del concepto, el cual es distinto al parámetro representado en la lista anterior.

El proceso de *fuzziificación* es distinto para cada concepto, pero por regla general se sigue la siguiente idea:

1. Se toma un valor del entorno del agente que tenga relación con el concepto a *fuzziificar*, llamémosle *variable de fuzziificación*.

2. Se obtiene un intervalo de valores utilizando el parámetro del concepto, llamémosle *intervalo de fuzzificación*.
3. Se compara la *variable de fuzzificación* con los extremos del *intervalo de fuzzificación*, en el caso de encontrarse incluida en este se decide si es más importante que este cerca del máximo o del mínimo del *intervalo de fuzzificación* y se *fuzzifica* de acuerdo al intervalo, teniendo en cuenta cual extremo es considerado 1 y cual 0 en el proceso de *fuzzificación*.

Sea v la *variable de fuzzificación*.

Sea (i_0, i_1) el *intervalo de fuzzificación*.

Sea r el resultado del proceso de *fuzzificación*.

Sea inv una variable booleana, tal que: $if\ inv = True, v \geq i_1 \Rightarrow r = 1$, $if\ inv = False, v \leq i_0 \Rightarrow r = 1$

Cuando v se encuentra dentro del intervalo ocurre lo siguiente:

$$if\ inv = True \Rightarrow r = \frac{v-i_0}{i_1-i_0}$$

$$if\ inv = False \Rightarrow r = \frac{i_1-v}{i_1-i_0}$$

La combinación de valores en estos conceptos, o el valor de un concepto por sí mismo, afecta al valor que toma algún concepto en la categoría *Sentimientos*.

2.4.2. Sentimientos

En esta categoría se tienen en cuenta los sentimientos básicos de un ser humano y los que mejor se adaptaban para representar la movilidad de los mismos.

Conceptos definidos para la categoría Sentimientos:

- Miedo.
- Hambre.
- Necesidad.
- Enfermedad.
- Indiferencia.
- Cansancio.

2.4.3. Acciones

Se definen las acciones fundamentales que modelan el comportamiento de una persona en un ambiente epidémico.

Conceptos definidos para la categoría Acciones:

- Ir a trabajar.
- Ir al mercado.
- Ir al hospital.
- Caminar.
- Estudiar.
- Descansar.
- Prevenir.

Definamos ahora los conceptos que tienen relación entre sí, es decir que conceptos influyen en el valor de otros. Para esto será necesario ilustrar en una imagen el grafo resultante.

Capítulo 3

Detalles de Implementación y Experimentos

Conclusiones

Conclusiones

Recomendaciones

Recomendaciones

Bibliografía

- Bagni, R., Berchi, R., & Curiello, P. (2002). A comparison of simulation models applied to epidemics. *J Artif Soc Social Simul*, 5(3) (vid. pág. 8).
- Balcan, D., Colizza, V., Gonçalves, B., Hu, H., Ramasco, J., J., & Vespignani, A. (2009). Multiscale mobility networks and the spatial spreading of infectious diseases. *PNAS*, 106(51) (vid. pág. 3).
- Bissett, K., Cadena, J., Khan, M., & et al. (2021). Agent-Based Computational Epidemiological Modeling. *J Indian Inst Sci* 101, 303–327 (vid. pág. 8).
- Epstein, J. M. (2008). Why Model? *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 11(4) (vid. pág. 2).
- Eubank, S., Guclu, H., Anil Kumar, V., & et al. (2004). Modelling disease outbreaks in realistic urban social networks. *Nature*, 429 (vid. pág. 7).
- Ferguson, N., Cummings, D., Fraser, C., & et al. (2006). Strategies for mitigating an influenza pandemic. *Nature*, 442 (vid. pág. 3).
- Gubler, D., J., & Clark, G., G. (1995). Dengue/Dengue Hemorrhagic Fever: The Emergence of a Global Health Problem. *Dispatches*, 1(2) (vid. pág. 1).
- Jennings, N., R. (2000). On agent-based software engineering. *Artificial Intelligence*, 117 (vid. pág. 7).
- Kermack, W. O., & McKendrick, A. G. (1927). A Contribution to the Mathematical Theory of Epidemics. *The Royal Society*, 115(772) (vid. pág. 3).
- Kosko, B. (1986). Fuzzy cognitive maps. *Int. J. Man-Machine Studies*, 24 (vid. pág. 8).
- Macal, C., & North, M. (2010). Tutorial on agent-based modelling and simulation. *J Simulation* 4, 151–162 (vid. pág. 7).
- Morens, D., Folkers, G., & Fauci, A. (2004). The challenge of emerging and re-emerging infectious diseases. *Nature*, 430 (vid. pág. 5).
- Nachazel, T. (2021). Fuzzy cognitive maps for decision-making in dynamic environments. *Genetic Programming and Evolvable Machines*, 22(1) (vid. pág. 9).
- Newman, M. E. J. (2003). The structure and function of complex networks (vid. págs. 5, 6, 15).
- Poczeta, K., Papageorgiou, E., & Gerogiannis, V. (2020). Fuzzy Cognitive Maps Optimization for Decision Making and Prediction. *Mathematics*, 8(11) (vid. pág. 9).

- Reisen, W. K. (2010). Landscape epidemiology of vector-borne diseases. *Annual Review of Entomology*, 55 (vid. pág. 11).
- Simmons, P., C., Farrar, J., J., Vinh Chau, N., & Wills, B. (2012). Dengue. *N. Engl. J. Med.*, 366 (vid. pág. 13).
- Tercero-Gutiérrez, M., José, & Olalla-Herbosa, R. (2008). Enfermedades tropicales transmitidas por vectores. Medidas preventivas y profilaxis. *Elsevier*, 27(6) (vid. pág. 12).
- Torres-Castro, M., Noh-Pech, H., René, Lugo-Caballero, C., Israel, Dzul-Rosado, K., Rossanet, & Puerto, F., I. (2020). Las enfermedades transmitidas por vector: importancia y aspectos epidemiológicos. *Bioagrociencias*, 13(1) (vid. pág. 12).
- WHO. (2020). Vector-borne diseases (vid. págs. 11, 13).
- WHO. (2023). Dengue and severe dengue (vid. págs. 13, 14).
- Zadeh, L., A. (1965). Fuzzy Sets. *Information and Control*, 8 (vid. págs. 19, 20).