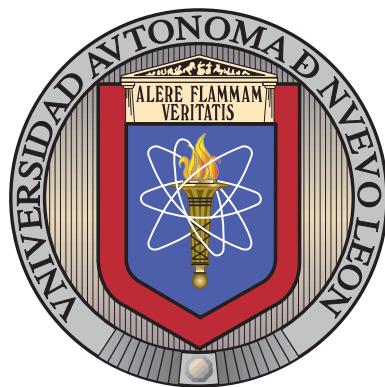


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



SIMULACIÓN DE EPIDEMIAS
BAJO MEDIDAS DE CONTINGENCIA

POR

ERICKA FABIOLA VÁZQUEZ ALCALÁ

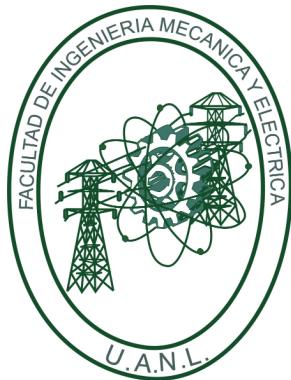
COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CON ORIENTACIÓN EN SISTEMAS

AGOSTO 2022

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



SIMULACIÓN DE EPIDEMIAS
BAJO MEDIDAS DE CONTINGENCIA

POR

ERICKA FABIOLA VÁZQUEZ ALCALÁ

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CON ORIENTACIÓN EN SISTEMAS

AGOSTO 2022



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis *Simulación de epidemias bajo medidas de contingencia*, realizada por la alumna Ericka Fabiola Vázquez Alcalá, con número de matrícula 1564189, sea aceptada para su defensa como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería con orientación en Sistemas.

El Comité de Tesis

Dra. Satu Elisa Schaeffer
Co-asesora

Dr. José Arturo Berrones Santos
Co-asesor

Dr. Romeo Sánchez Nigenda
Revisor

Vo. Bo.

Dr. Simón Martínez Martínez
Subdirector de Estudios de Posgrado

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, agosto 2022

A mi papá en el cielo, a mi mamá, y a Gerardo.

ÍNDICE GENERAL

Agradecimientos	ix
Resumen	x
1. Introducción	1
1.1. Hipótesis y objetivo	3
1.2. Estructura de la tesis	4
2. Marco teórico	5
2.1. Grafos	5
2.2. Redes Multi-agentes	7
2.2.1. Sistemas multi-agente	7
2.2.2. Redes complejas	8
2.2.3. Redes complejas multi-agente	9
2.3. Modelos epidemiológicos	12
2.4. Procesos de Poisson	13

3. Revisión bibliográfica	15
3.1. Análisis Comparativo	15
3.2. Área de Oportunidad	17
4. Metodología	19
4.1. Medidas de contingencia	20
4.1.1. Vacunación	21
4.1.2. Cubrebocas	21
4.1.3. Aislamiento	22
5. Resultados	23
5.1. Vacunación	24
5.2. Cubrebocas	25
5.3. Aislamiento	25
5.4. Aislamiento con cubrebocas	26
6. Conclusiones	33
6.1. Contribuciones	33
6.2. Trabajo a futuro	34

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1. Ejemplos de grafos.	6
2.2. Conexidad.	6
2.3. Ejemplos de redes complejas.	8
2.4. Correspondencia entre un sistema multi-agente y una red compleja. .	10
2.5. Modelos compartimentales.	14
4.1. Distribución de los grados de los nodos de la red.	20
5.1. Vacunando a los nodos influyentes de la red.	24
5.2. Vacunando nodos al azar de la red.	25
5.3. Cubrebocas.	26
5.4. Aislamiento.	27
5.5. Uso de cubrebocas combinado con aislamiento.	29
5.6. Coeficientes de correlación de los resultados obtenidos variando el porcentaje de las distintas poblaciones que usa cubrebocas.	31
5.7. Coeficientes de correlación de los resultados obtenidos variando el porcentaje de aislamiento que se le asigna a las distintas poblaciones.	32

ÍNDICE DE CUADROS

3.1. Comparativa entre trabajos revisados.	18
4.1. Distribución de perfiles de riesgo en una población (Cerami <i>et al.</i> , 2021). .	22

AGRADECIMIENTOS

Mis más profundos agradecimientos a la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) por la oportunidad que me ha brindado de formarme en sus aulas desde el nivel medio superior, y por los apoyos económicos derivados de los proyectos *Simulación de epidemias bajo medidas de contingencia* (CE1842-21, Mayo 2021 - Diciembre 2021) y *Exploración algorítmica de relaciones entre calidad de aire y bienestar* (CE1421-20, Agosto 2020 – Diciembre 2020). A la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, por acogerme para mis estudios de maestría. Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el financiamiento otorgado para que pudiera estudiar de tiempo completo.

Agradezco al Posgrado en Ingeniería de Sistemas por recibirme como estudiante de maestría, en especial a mis asesores Satu Elisa Schaeffer y José Arturo Berrones Santos, sin cuya orientación y apoyo no habría podido obtener este grado. También a mis revisores por aceptar formar parte de mi comité de tesis y por sus valiosas observaciones.

En especial, agradezco a Gerardo Palafox Castillo por apoyarme en todo momento y por alentarme a seguir adelante con mis estudios.

RESUMEN

Ericka Fabiola Vázquez Alcalá.

Candidato para obtener el grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería con orientación en Sistemas.

Universidad Autónoma de Nuevo León.

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

Título del estudio: SIMULACIÓN DE EPIDEMIAS BAJO MEDIDAS DE CONTINGENCIA.

Número de páginas: 41.

OBJETIVOS Y MÉTODO DE ESTUDIO: El objetivo es diseñar una simulación de un modelo epidemiológico utilizando una combinación de redes complejas y sistemas multi-agentes, el cuál permita explorar la magnitud del impacto que distintas medidas de contingencia, o la ausencia de estas (específicamente, del uso de cubrebocas, distanciamiento social y aislamiento) tengan en la propagación de la enfermedad, como lo son porcentaje final de infectados, duración de la epidemia, máxima cantidad de infectados simultáneamente. Se representa la población mediante una red, donde los nodos representan individuos y las aristas son los contactos que surgen entre estos; a cada nodo se le asigna uno de cuatro perfiles de riesgo que determina su comportamiento ante la epidemia. El modelo compartimental con el que se trabaja es un modelo SIR.

CONTRIBUCIONES Y CONCLUSIONES: En este trabajo, se realizan simulaciones de procesos infecciosos en modelos de redes multi-agentes bajo distintas medidas de contingencia, estudiando sistemáticamente los efectos de las mismas en la cantidad final de infectados. Se concretó un programa computacional de código abierto¹ con el cuál se puede simular un proceso infeccioso, ajustando la tasa de contagio y recuperación de éste, así como las medidas de contingencia deseadas y la red subyacente

de contactos. Esto potencialmente facilita la toma de decisiones para el control de epidemias.

Firmas de los asesores

Dra. Satu Elisa Schaeffer
Co-asesora

Dr. José Arturo Berrones Santos
Co-asesor

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Los modelos matemáticos intentan capturar el funcionamiento del mundo real para explicar ciertos comportamientos y para predecir sucesos. La desventaja de estos es que no importa que tan complicado sea el modelo, ninguno será perfecto debido a la complejidad del mundo real. George Box dice que “Todos los modelos están equivocados; algunos modelos son útiles”. El enfoque de modelado matemático ha sido utilizados para estudiar epidemias y así ayudar en la toma de decisiones para responder de forma rápida y efectiva contra enfermedades emergentes (Badham *et al.*, 2021; Lipsitch *et al.*, 2011). En este trabajo se busca construir un modelo útil que pueda medir el impacto de distintas medidas de contingencia en el esparcimiento de una enfermedad contagiosa.

La humanidad ha sido asediada por enfermedades infecciosas a lo largo de la historia. Ejemplos en la era moderna incluyen las epidemias del SARS, MERS, influenza AH1N1 ébola y en la actualidad, el SARS CoV-2, virus que causa la enfermedad conocida como *covid-19*. Ante estas eventualidades, gobiernos de distintos niveles deben adoptar medidas prontas y efectivas para evitar una crisis de salud pública. Sin embargo es difícil saber el impacto que tendrán las acciones tomadas ante un sistema complejo y dinámico, como lo es la propagación de una enfermedad en una población. Ante la inviabilidad logística, y quizá ética, de ensayar distintas medidas directamente a nivel población, surge la necesidad de realizar ensayos

computacionales mediante modelos matemáticos de la enfermedad. La naturaleza aleatoria y evolutiva de los procesos de contagio hace de las simulaciones estocásticas una de las maneras más efectivas de estudiar y predecir el fenómeno.

El uso de redes como una forma de modelar se ha utilizado en diversas áreas de la ciencia (ver por ejemplo la parte 1 del libro de Newman (2018)). Particularmente han encontrado uso en estudiar el esparcimiento de una infección, y en técnicas para mitigar el impacto de la misma. Anteriormente en los modelos epidemiológicos se consideraba una población homogénea, donde todos los individuos podían contagiar a cualquier otro individuo (Bailey, 1975). Conforme el paso del tiempo surgió la necesidad de incorporar diversas características a estos modelos para permitirles ser más acertados, como la estructura de contactos que existe en la población, características específicas de los individuos como su estado socio-económico, edad, sexo, entre otros. Una forma de lograr esto fue modelar a la población mediante el uso de redes.

Diversos modelos se han implementado para el modelado de epidemias, desde los simples que solamente segmentan a la población en pocos compartimientos de estado de infección, hasta otros más complejos que utilizan redes de gran escala basados en agentes para simular características individuales. Los modelos simples permiten analíticamente estudiar mecanismos básicos como si ocurrirá una epidemia, cuánto durará y qué tan grande será, pero se sacrifica precisión asumiendo efectos secundarios. Usando modelos que incorporan mayor detalle en el comportamiento individual y en la enfermedad, se tendría un mayor poder de predicción, pero debido a su complejidad se necesita mayor esfuerzo computacional.

Un modelo determinista no puede capturar las incertidumbres asociadas al mundo real. Por ejemplo, un individuo infectado contagia a otro siempre con alguna probabilidad, y no con certeza absoluta. Esto nos motiva a adoptar modelos estocásticos con la esperanza de obtener resultados más realistas.

Las técnicas de simulación multi-agente permiten analizar y cuantificar los efec-

tos de distintas medidas de contención ante la propagación de enfermedades, tales como el distanciamiento social, el uso de cubrebocas, o el aislamiento social, además de interacciones con otros factores como la densidad poblacional, nivel socioeconómico y la calidad del aire. La comprensión de estas diferencias conlleva a una toma de decisiones facilitada y basada en evidencia científica. Aunado a esto, representar las conexiones e interacciones entre nuestros agentes por medio de una red, permite el uso de técnicas matemáticas bien estudiadas de teoría de grafos y sistemas de propagación en redes. Así, al combinar la estructura de contacto poblacional usando redes con las características que se le asignan a un agente, se busca modelar de una manera eficiente, y un poco más real, el esparcimiento de una epidemia. Este tipo de modelos se han implementado para describir el comportamiento de la epidemia del VIH (Mei *et al.*, 2010a). Combinando estas metodologías, confiamos que las redes complejas multi-agente son idóneas para la simulación estocástica de epidemias bajo medidas de contención.

1.1 HIPÓTESIS Y OBJETIVO

La hipótesis es que la simulación de modelos epidemiológicos por medio de redes multi-agente permite observar y cuantificar el impacto que distintas medidas de contención tienen en la propagación de una enfermedad infecciosa. Esto permitiría una toma de decisiones públicas más informada y con mejores resultados.

El objetivo general es diseñar, implementar y analizar una simulación multi-agente epidemiológica en una red que permita medir los efectos que tienen distintas medidas de contención contra el contagio y propagación de una enfermedad infecciosa. Los objetivos específicos para el presente trabajo son:

Modelación. Diseñar una simulación multi-agente en red de un modelo epidemiológico, el cuál permita medir la propagación de una enfermedad infecciosa bajo distintas medidas de contingencia. Específicamente, del uso de cubrebo-

cas, distanciamiento social y aislamiento.

Implementación. Implementar un prototipo computacional del modelo desarrollado para explorar la magnitud del impacto que distintas medidas de contingencia, o la ausencia de estas, tengan en medidas clave de la propagación de la enfermedad, como lo son porcentaje final de infectados, duración de la epidemia, máxima cantidad de infectados simultáneamente.

Visualización. Crear visualizaciones de la propagación de la enfermedad en una red acorde a los resultados obtenidos con la implementación del modelo mencionado, así como del impacto de las medidas de contingencia.

1.2 ESTRUCTURA DE LA TESIS

En el capítulo 2 se describen los conceptos de teoría de grafos, sistemas multi-agente, modelos epidemiológicos y de procesos markovianos necesarios para la comprensión de este trabajo. En el capítulo 3 se realiza una revisión de la literatura relacionada al tema, también se muestra una comparativa con los trabajos actuales y nuestro trabajo. En el capítulo 4 se describe la metodología empleada para la solución del problema. Por último en el capítulo 5 se muestran los resultados obtenidos de los experimentos y en el capítulo 6 se describen las conclusiones obtenidas.

CAPÍTULO 2

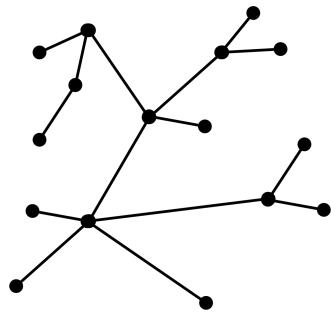
MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se da una introducción básica de los conceptos matemáticos que se utilizarán a lo largo de la tesis. En la sección 2.1 se definen los conceptos básicos de teoría de grafos, en la sección 2.2 se habla de conceptos necesarios de sistemas multi-agentes y redes complejas para definir lo que es una red compleja multi-agente. En la sección 2.3 se define lo que es un modelo epidemiológico de compartimentos y se definen los modelos más empleados en la literatura. En la sección 2.4 se define lo que es un proceso de Poisson.

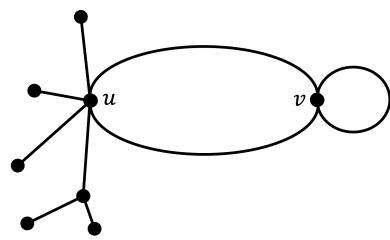
2.1 GRAFOS

Un grafo (o red) simple es una dupla $G = (V, E)$ que consiste de un conjunto de vértices V y un conjunto de aristas $E = \left\{ \{u, v\} \mid u, v \in V, u \neq v \right\}$ que no posee bucles o aristas múltiples. En la figura 2.1a se tiene un ejemplo de un grafo simple, mientras que en la figura 2.1b se muestra un grafo no simple, ya que contiene dos aristas que conectan a u y v , además de que se tiene el bucle $\{v, v\}$. Cuando existe una arista $\{u, v\} \in E$ se dice que u y v son *adyacentes* y son *vecinos*. Al número de aristas que conecta a un nodo con otros se le denomina *grado* del vértice.

Un camino entre vértices v_0 y v_n es una secuencia ordenada de vértices $v_0, v_1,$

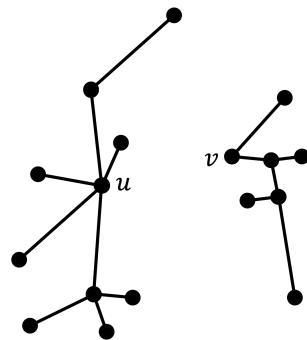


(a) Grafo simple.

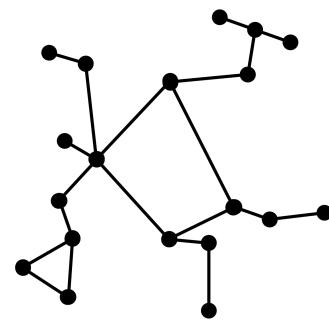


(b) Grafo no simple.

FIGURA 2.1: Ejemplos de grafos.



(a) Grafo desconexo.



(b) Grafo conexo.

FIGURA 2.2: Conexidad.

$v_2 \dots, v_n$ tal que cualesquiera dos vértices consecutivos son adyacentes. A v_0 y v_n se les llama extremos del camino y se dice que están *conectados*. Si para cualesquiera dos nodos $u, v \in V$ en un grafo $G = (V, E)$ existe un camino para los cuales u, v están conectados, se dice que G es *conexo*.

En la figura 2.2 se muestra un ejemplo de grafo desconexo, figura 2.2a, ya que en este grafo no existe un camino para los cuales los vértices u y v sean extremos, es decir, no están conectados. En la figura 2.2b se tiene un grafo que sí es conexo, ya que podemos encontrar un camino para que cualesquiera dos vértices estén conectados. Más sobre teoría de grafos se puede encontrar en el libro de Bollobás (1998).

2.2 REDES MULTI-AGENTES

Una red multi-agente intenta combinar las propiedades de los sistemas multi-agentes y de las redes complejas para simular epidemias tanto de forma individual como de forma poblacional. Cada agente tiene una información individual y personal, la red compleja trabaja con las relaciones dinámicas entre estos agentes.

2.2.1 SISTEMAS MULTI-AGENTE

Un sistema basado en agentes consiste de un conjunto de entidades heterogéneas, llamadas *agentes*, que interactúan entre sí acorde a un sistema de reglas. A través de estas interacciones emergen fenómenos a nivel del sistema. Estos agentes tienen ciertas características (Mei *et al.*, 2015):

Autonomía. El agente actúa conforme a su base de creencias.

Visión Local. Ningún agente tiene una visión global del sistema, o el sistema es demasiado complejo para el entendimiento del agente.

Descentralización. No hay control del agente.

Macal (referencia) da definiciones para los modelos basados en agentes de acuerdo a cierto tipo de características que poseen, como

Individual. Es aquel en el que los agentes en el modelo son representados individualmente y tiene diversas características.

Autónomo. Es aquel en el que los agentes individuales tienen comportamientos internos que les permiten ser autónomos, capaces de sentir cualquier condición que ocurre en el modelo en cualquier tiempo, y actuar apropiadamente de acuerdo a su comportamiento.

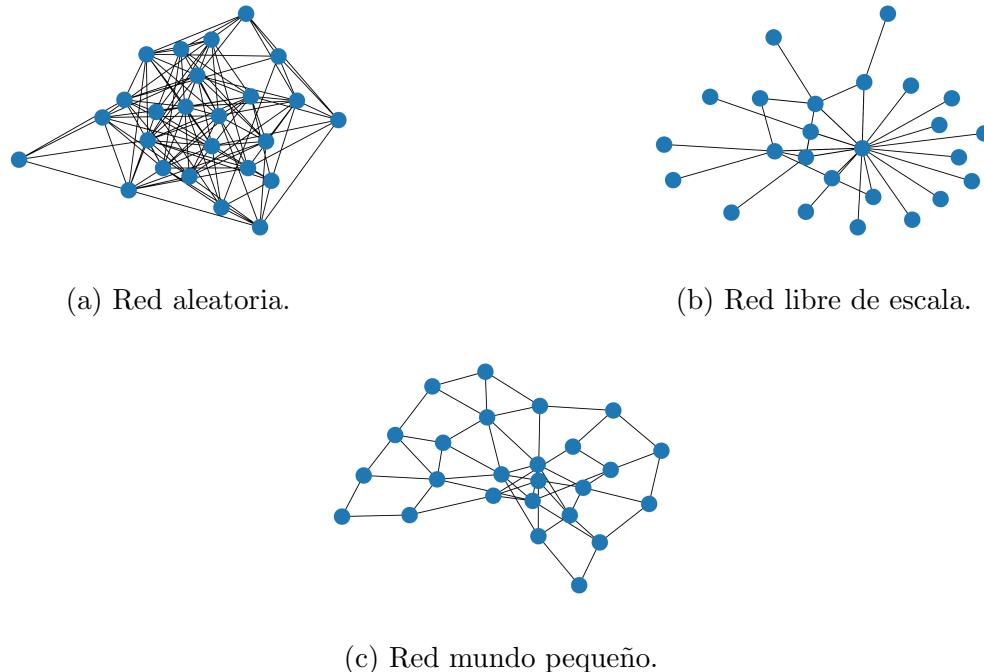


FIGURA 2.3: Ejemplos de redes complejas.

Interactivo. Es aquel en los agentes autónomos interactúan con otros agentes y con el entorno.

Adaptativo. Es aquel en el cual los agentes autónomos que interactúan cambian sus comportamientos durante la simulación, conforme los agentes aprenden, se encuentran con situación nuevas, o como población ajustan su composición para incluir grandes proporciones de agentes sean los que se adaptan satisfactoriamente.

2.2.2 REDES COMPLEJAS

Una red compleja puede ser descrita como un grafo compuesto de un conjunto de vértices y un conjunto de aristas. Existen diversos tipos como, libre de escala, mundo pequeño y redes aleatorias. La figura 2.3 muestra un ejemplo de dichas redes.

Libre de escala. Es un tipo de red con una distribución de grados que sigue una ley de potencia de la forma $P(k) \sim k^{-\gamma}$, donde k es el grado, $P(k)$ es la probabilidad de que un nodo tenga grado k , y γ es el exponente de la ley de potencia.

Mundo pequeño. Son redes en donde la mayor parte de pares de vértices están conectados a través de un camino corto.

Redes aleatorias. Son la forma más simple de un grafo complejo, en el cuál cada par de nodos están conectados aleatoriamente con una probabilidad independiente p . La distribución de los grados de este tipo de grafos siguen una distribución de Poisson.

2.2.3 REDES COMPLEJAS MULTI-AGENTE

Se define una red compleja multi-agente de la misma forma que una red compleja simple, donde se reemplazan los vértices por agentes. Las aristas representan los contactos, interacciones o relaciones entre los agentes, y estas pueden cambiar con el tiempo. En la imagen 2.4 se muestra la correspondencia entre una red y un modelo multi-agente. Se define la red como

$$G(t) = (\mathbb{V}(t), \mathbb{E}(t)) \quad (2.1)$$

donde si $v \in \mathbb{V}(t)$, a este se le llama *nodo agente*. Cada arista $a \in \mathbb{E}(t)$ conecta a dos nodos agentes formada por la interacción de estos dos.

Las redes complejas multi-agente evolucionan con el tiempo t , por lo que son dinámicas. En este tiempo, los nodo agente cambian entre estados y las aristas varían entre si existen o no, o en el peso que se les pudiera asignar.

Cada nodo agente posee ciertas características y atributos, que se definen a continuación (Mei *et al.*, 2015):

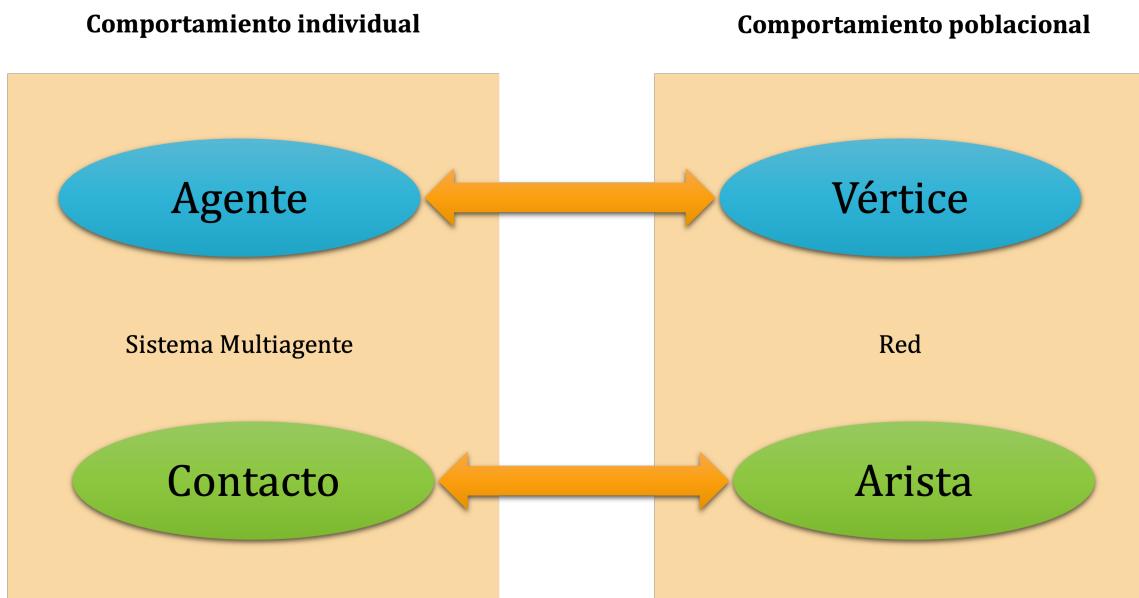


FIGURA 2.4: Correspondencia entre un sistema multi-agente y una red compleja.

Estado. Es una abstracción de los atributos de los agentes, describe el estado, fase o actividad en el que el agente se encuentra.

Evento. Cambios en el estado del sistema en el punto de tiempo t .

Acción. Es la ejecución que causa cambios en el mismo individuo o en el entorno, y es el componente básico del comportamiento.

Actividad. Es una orden de secuencias que se activan por los eventos o son iniciadas por los individuos.

Comportamiento. Representa las reacciones al entorno y sus posibles acciones.

Para medir el esparcimiento de la enfermedad infecciosa, se pueden usar distintas métricas.

1. *Casos totales*, por lo general se denota por T , y como su nombre lo indica es el total de agentes que permanecen en estado infeccioso después de un periodo determinado de tiempo t .

2. *Nuevos casos*, denotado por N , es el número de agentes que se infectan en un determinado periodo de tiempo.
3. *Muertes*, se suele denotar por D y es el número de agentes que se mueren en un periodo de tiempo determinado.
4. *Prevalencia*, se denota por P , es el cociente de los casos totales y el tamaño de la población.
5. *Tasa de incidencia*, denotado por I , es el número de casos nuevos por población en un periodo de tiempo dado.
6. *Mortalidad*, se denota por M , es la fracción de muertes y el tamaño total de la población en un periodo de tiempo.
7. *Número de reproducción*, se denota por R , es el número de casos promedio que un infectado genera durante el transcurso de su tiempo en ese estado.

El estado del sistema (es decir, de la población en general) se guarda en términos de las medidas que se tienen para el esparcimiento de la epidemia dependiendo del tiempo,

$$\Omega = \{T(t), N(t), D(t), P(t), I(t), M(t), R(t)\}. \quad (2.2)$$

Para calcular Ω en términos de la red compleja multi-agente $G^t = (\mathbb{V}^t, \mathbb{E}^t)$, se utiliza los siguientes conjuntos de nodos agente,

$$\mathbb{I}(t) = \text{agentes que permanecen infectados en el periodo de tiempo } t, \quad (2.3)$$

$$\mathbb{S}(t) = \text{agentes que han sido infectados antes del tiempo } t, \quad (2.4)$$

$$\mathbb{N}(t) = \text{agentes que se infectan justo en el periodo de tiempo } t, \quad (2.5)$$

$$\mathbb{D}(t) = \text{agentes que murieron en el periodo de tiempo } t, \quad (2.6)$$

$$\mathbb{T}(t, \mathbb{V}_i) = \{\mathbb{V}_j \mid \exists k \in [1, t] \Rightarrow \exists \mathbb{E}_{i,j}^k \wedge \text{agente}_i^k \text{ infecta agente}_j^k\}, \quad (2.7)$$

con lo que tenemos

$$\Omega = \begin{cases} T(t) = |\mathbb{I}(t)|, \\ N(t) = |\mathbb{N}(t)|, \\ D(t) = |\mathbb{D}(t)|, \\ P(t) = \frac{T(t)}{|\mathbb{V}^t|}, \\ I(t) = \frac{N(t)}{|\mathbb{V}^t|}, \\ M(t) = \frac{D(t)}{|\mathbb{V}^t|}, \\ R(t) = \frac{\sum_{k=1}^{|\mathbb{S}(t)|} |\mathbb{T}(t, \mathbb{S}(t)_k)|}{|\mathbb{S}(t)|}. \end{cases} \quad (2.8)$$

2.3 MODELOS EPIDEMIOLÓGICOS

Se trabaja con modelos epidemiológicos de compartimentos, a tiempo continuo, modelando la población subyacente con un grafo $G = (V, E)$. En estos se tiene una cantidad finita de compartimentos C_1, \dots, C_q , y en el tiempo t , cada nodo $u \in V$ es asignado a un C_i para un solo $i \in \{1, \dots, q\}$. A continuación se mencionan algunos de los modelos más conocidos, refiriendo al lector al capítulo 16 del libro de Newman (2018) o al artículo de Pastor-Satorras *et al.* (2015) para más detalles.

El modelo SI Es el modelo más simple ya que se consideran solamente dos estados S (*susceptible*) y I (*infectado*); en el caso de que un individuo sea susceptible significa que es alguien que aún no tiene la enfermedad pero podría tenerla si entra en contacto con otro que sí la tenga. Un individuo infectado es aquel que tiene la enfermedad y que puede transmitirla si entra en contacto con algún

individuo que sea susceptible. En la figura 2.5a se muestra un diagrama de flujo del modelo SI, como se aprecia, una vez que el individuo pasa a ser infectado ya no podrá salir de dicho estado.

El modelo SIS. A diferencia del modelo anterior, en modelo SIS se puede tener una reinfección de la enfermedad, es decir el individuo infeccioso pasa de nuevo a ser susceptible después de un tiempo, no adquiere una inmunidad a la infección por haberla tenido. En la figura 2.5b se muestra los cambios de estados que este modelo permite.

El modelo SIR. En este modelo se trabaja con otro estado R , al que se le denomina *recuperado*, el cual representa que un individuo infeccioso adquiere inmunidad a la enfermedad después haberse recuperado. En la figura 2.5c se muestra como un individuo puede cambiar de estados en este modelo.

El modelo SIRS. Existen modelos más complejos, en los cuales se trabaja con inmunidad temporal. Un individuo infeccioso pasa a recuperado después de un tiempo determinado y está en dicho estado solo un tiempo para pasar nuevamente a ser susceptible y poder infectarse nuevamente de la enfermedad. En la figura 2.5d se muestra los cambios de estados de este modelo.

El modelo SEIR. Para este modelo se trabaja con un estado extra que se representa con E y significa que un individuo susceptible estuvo *expuesto* a la enfermedad y esta aún no se ha desarrollado al punto de que pueda transmitirla a otros individuos. En la figura 2.5e se muestra el diagrama de flujo de los estados de este modelo.

2.4 PROCESOS DE POISSON

Un *proceso estocástico* $\{X(t) : t \in \mathbf{T}\}$ es una colección de variables aleatorias, indexada por un conjunto \mathbf{T} que interpretamos como el tiempo, donde las variables

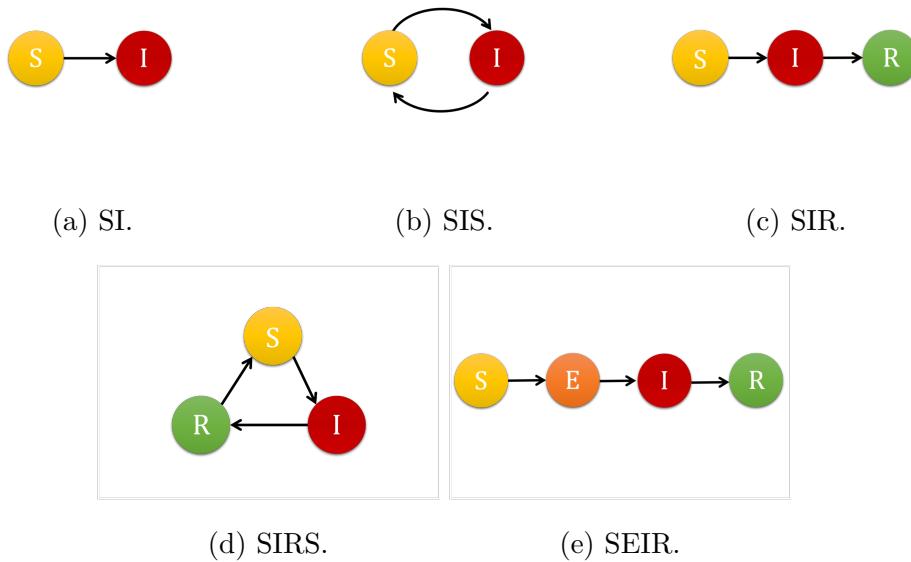


FIGURA 2.5: Modelos compartimentales.

toman valores en un conjunto S llamado espacio de estados. Cuando \mathbf{T} es un conjunto contable, decimos que el proceso es de tiempo discreto. Cuando \mathbf{T} es un intervalo en la recta real, decimos que el proceso es de tiempo continuo (Rincón, 2007; Ross, 2014). Sea T_1, T_2, \dots una sucesión de variables aleatorias independientes, donde para cada i , T_i tiene distribución $\text{Exp}(\lambda)$. Rincón (2007) define el *proceso de Poisson con parámetro λ* como el proceso estocástico a tiempo continuo $\{X_t : t \in [0, \infty)\}$ definido por

$$X_t = \max\{n \geq 1 : T_1 + \dots + T_n \leq t\}, \quad (2.9)$$

donde $\max \emptyset := 0$. En investigación de operaciones, algunos modelos de líneas de espera consideran los tiempos de llegadas a un sistema como un proceso de Poisson (Hillier y Lieberman, 2002). En el contexto de simulación de epidemias, los tiempos en que un individuo infectoso contacta a sus vecinos en el proceso SIR Markoviano, siguen un proceso de Poisson (Britton, 2020).

CAPÍTULO 3

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo muestra una revisión de la literatura en modelos epidémicos hasta la fecha, con o sin enfoque multiagente. En la sección 3.1 se realiza un análisis comparativo de los trabajos encontrados. La sección 3.2 detalla las áreas de oportunidad identificadas para el presente trabajo.

3.1 ANÁLISIS COMPARATIVO

Los modelos matemáticos para el estudio de epidemias han sido estudiados por décadas (Bailey, 1975; Britton, 2010). En particular, los modelos con población heterogénea representada por medio de redes han sido ampliamente analizados en tiempos recientes (López-García, 2016; Britton, 2020; Van Mieghem *et al.*, 2009; Spricer y Britton, 2019; Pastor-Satorras *et al.*, 2015; Danon *et al.*, 2011). Entre las investigaciones realizadas se encuentran trabajos que buscan predecir el tamaño final de una epidemia con cierta probabilidad (Trapman y Bootsma, 2009; Ball *et al.*, 2009), controlar el contagio (Nowzari *et al.*, 2016), estudiar el impacto de las medidas de contención de la propagación del virus (Fransson y Trapman, 2019), la duración de una epidemia en redes con cierta secuencia de grado (Lashari *et al.*, 2020). Los estudios han abarcado más allá del modelo SIR estocástico que usamos en este trabajo. Por ejemplo, existen trabajos que abordan un punto de vista deter-

minístico (Mei *et al.*, 2017), epidemias con inmunidad temporal (Li *et al.*, 2014; Ruhi y Hassibi, 2015; Zheng y Tang, 2019; Zhong *et al.*, 2017; Ottaviano y Bonaccorsi, 2019; Cai *et al.*, 2017), epidemias en redes de orden superior (Cisneros-Velarde y Bullo, 2020; Iacopini *et al.*, 2019). Algunos de los retos que aún enfrenta el área se pueden encontrar en el trabajo de Pellis *et al.* (2015).

Se ha utilizado los modelos basados en agentes para la modelación diversas epidemias (Gordon, 2003; Hassin, 2021; Perez y Dragicevic, 2009) como la del VIH (Tewelde medhin *et al.*, 2004) y SARS-CoV-2 (Höertel *et al.*, 2020). Una de los beneficios de trabajar con agentes es poder modelar el comportamiento humano (Bona beau, 2002) y ciertas características como la movilidad (Friás-Martínez *et al.*, 2011). Varias estrategias para la contención de la epidemia han sido implementadas, como la vacunación (Nadini *et al.*, 2020; Peng *et al.*, 2010), distancia social (Paarporn *et al.*, 2015), usando declaraciones de emergencia (Azizi *et al.*, 2020). Silva *et al.* (2020) propone un modelo basado en agentes con el cual, además de medir el impacto de distintos escenarios usando distintas medidas de contingencia en la epidemia, mide el impacto que hay de la misma en el ámbito económico.

Los modelos basados en agentes, además de ser usados para el estudio de epidemias (Hassin, 2021; Höertel *et al.*, 2020; Perez y Dragicevic, 2009), también se han usado para abordar problemas de transporte (Hörl, 2017) o finanzas (Samitas *et al.*, 2018).

Nuestro gobierno no está exento de los retos que presenta enfrentar una crisis sanitaria de naturaleza epidémica, y tomar la decisión equivocada puede tener costos exorbitantes tanto en materia económica como en vida humanas (Lipsitch *et al.*, 2011; Maringe *et al.*, 2020; Pasquini-Descomps *et al.*, 2017).

En el cuadro 3.1 se muestra una comparativa entre distintos trabajos y su metodología, como se aprecia, hay distintos trabajos que utilizan distintas medidas de contingencia para determinar que tan bien contienen la epidemia.

Se ha hecho uso de las redes complejas multi-agentes para modelar la epide-

mia de la influenza A (H1N1) (Mei *et al.*, 2010b) simulando escenarios utilizando diversas medidas de contingencia como el aislamiento solo de casos que hayan sido confirmados y una mezcla entre la medida anterior con una vacunación al azar de personas susceptibles. Por otra parte, Mei *et al.* (2011) analiza la epidemia del VIH entre hombres que tienen sexo con otros hombres, haciendo uso de las CAN para analizar el comportamiento de riesgo de las personas. Mediante la creación de distintos escenarios, concluyen que el perjuicio de altos comportamientos de riesgo superan los beneficios dados al recibir tratamiento farmacológico.

3.2 ÁREA DE OPORTUNIDAD

El presente trabajo se enmarca en el uso de redes complejas multi-agentes para modelar cualquier proceso infeccioso, sin restringirlo a alguna enfermedad o población particular. Se crea un programa de código abierto en el que se pueden ajustar las tasas de contagio y recuperación de la infección, así como variar distintas medidas de contingencia, o la red subyacente de contactos.

Cuadro 3.1: Comparativa entre trabajos revisados.

Trabajo	Modelo	Grafos	Multi-agentes	Vacunación al azar	Otro tipo de vacunación	Aislamiento	Cubrebocas
Mei <i>et al.</i> (2010a)	SI	✓	✓	✗	✗	✗	✗
Nadini <i>et al.</i> (2020)	SIR / SIS	✓	✓	✓	✓	✗	✗
Höertel <i>et al.</i> (2020)	SIR	✗	✓	✗	✗	✓	✗
Britton <i>et al.</i> (2007)	SIR	✓	✗	✓	✓	✗	✗
Silva <i>et al.</i> (2020)	SEIR	✗	✓	✗	✗	✓	✓
Grauer <i>et al.</i> (2020)	SIR	✗	✓	✗	✓	✗	✗
Mei <i>et al.</i> (2010b)	SIR	✓	✓	✗	✓	✓	✗
Trabajo actual	SIR	✓	✓	✓	✓	✓	✓

CAPÍTULO 4

METODOLOGÍA

En este capítulo se discute la metodología empleada del presente trabajo, como las características de la red utilizada, qué modelo epidemiológico se utiliza y como se modela las diversas medidas de contingencia.

Se representa una población mediante una red, donde los nodos representan a los individuos y las aristas representan los contactos que surgen entre ellos. En particular, como caso de estudio se toma una red real de contactos entre alumnos en una secundaria (Mastrandrea *et al.*, 2015), la cual posee 120 nodos y 348 aristas. La figura 4.1 muestra la distribución de los grados de los nodos de dicha red. Estos grados tienen un promedio de 5.8 y una varianza de aproximadamente 0.4468. La red tiene un promedio de clustering del 5.6434.

El modelo base de transmisión es el modelo markoviano SIR, donde cada nodo pertenece a uno y solo uno de los estados *susceptible*, *infectioso* o *recuperado*, con parámetros β (tasa de contagio) y γ (tasa de recuperación). Al tiempo $t = 0$, un nodo escogido uniformemente al azar se torna infectioso, mientras el resto permanece susceptible. Mientras un nodo es infectioso, tiene contactos infectiosos de manera aleatoria con sus vecinos susceptibles, acorde a procesos independientes de Poisson con tasa β . Cada nodo permanece infectioso durante un periodo de tiempo aleatorio con distribución exponencial con parámetro γ . Pasando su periodo de infección, el

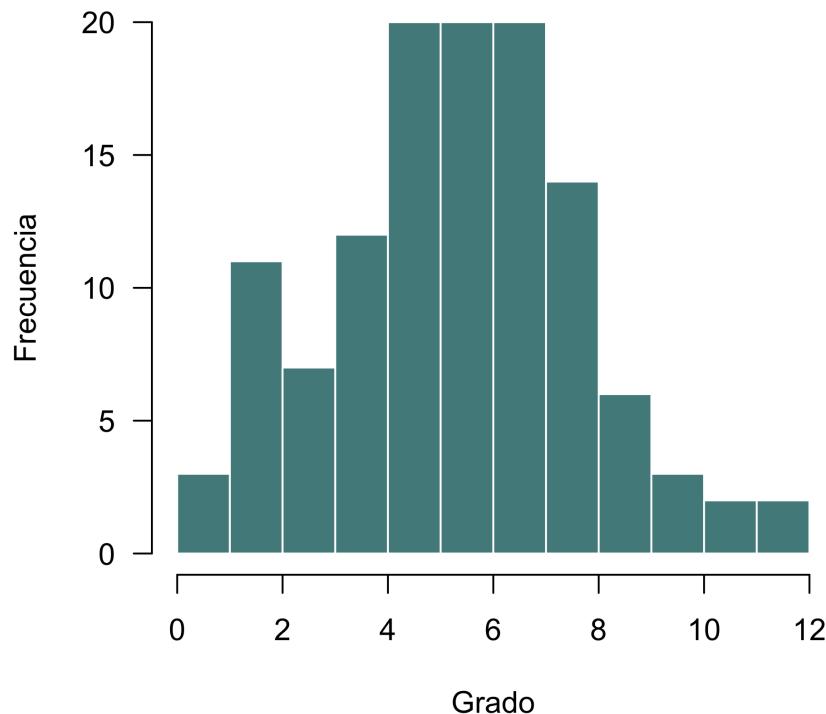


FIGURA 4.1: Distribución de los grados de los nodos de la red.

nodo pasa a ser recuperado y permanece inmune por el resto del proceso infeccioso, el cual concluye hasta el primer tiempo $t = T_f$ donde haya cero infecciosos. El tamaño final de la epidemia es el número de nodos que hayan resultado infectados durante el proceso, que corresponde con el número de nodos recuperados al tiempo T_f .

4.1 MEDIDAS DE CONTINGENCIA

El modelo markoviano SIR será modificado para incluir atributos en cada nodo y construir un modelo de epidemia bajo medidas de contingencia. A saber, en la sección 4.1.1 se identificarán nodos influyentes en la topología de la red mediante el algoritmo **Vote Rank**. En la sección 4.1.2 se describirá como se ve afectada la

epidemia cuando algunos nodos usan cubrebocas, acorde a un nivel de tolerancia al riesgo individual basado en la literatura (Cerami *et al.*, 2021). En la sección 4.1.3, los nodos tendrán conocimiento de la infección propia y de vecinos, y decidirán aislarse acorde a esto.

4.1.1 VACUNACIÓN

Una de las medidas de contención en una epidemia es la de vacunar a la población. La vacunación es un proceso costoso tanto por suministros como en logística, por lo que a veces resulta preferible escoger con cuidado a qué sectores de la población se inoculará. Usando el algoritmo `Vote Rank` de la librería `NetworkX`¹, se identifican a los nodos más influyentes del grafo, y se les identifica como recuperados desde el inicio de la epidemia. A su vez, comparamos los resultados anteriores con un modelo en el que se inoculan a elementos arbitrarios de la población, para medir la importancia de escoger con cuidado a los individuos a vacunarse.

4.1.2 CUBREBOCAS

Se escogen distintas fracciones aleatorias de la población para adoptar el uso de cubrebocas, cuyo impacto en la infectividad se refleja usando una tasa de contagio $\beta_{fm} : \beta_{fm} < \beta$ para estos nodos. Un estudio del impacto del uso de cubrebocas reporta que hay una disminución del entre 20 al 80 % por el uso de mascarillas de tela (Eikenberry *et al.*, 2020), en este caso se usa un valor de $\beta_{fm} = 0.5\beta$. Se compara el tamaño final de la epidemia en poblaciones con distintos porcentajes de adopción de cubrebocas.

¹<https://networkx.org/> versión 2.6.

Cuadro 4.1: Distribución de perfiles de riesgo en una población (Cerami *et al.*, 2021).

Actitud ante toma de riesgos	Distribución
Amante al riesgo	51.6 %
Neutral al riesgo	14.6 %
Ligeramente averso al riesgo	24.6 %
Altamente averso al riesgo	9.2 %

4.1.3 AISLAMIENTO

Cerami *et al.* (2021) menciona el nivel de aversión al riesgo a la salud que suele observarse en una población, dividiendo a la población de la forma descrita en el cuadro 4.1. Basado en este perfil, a los nodos de la red se les asignará una actitud ante la toma de riesgos y se aislarán de forma acorde. Específicamente, el aislamiento consistirá en particionar todos los aristas entre *abiertos* y *cerrados*, donde la infección solo puede pasarse de un nodo infeccioso a uno susceptible cuando estén unidos por una arista abierta. Acorde a su perfil de riesgo, un nodo que pase a infeccioso, cerrará un porcentaje de las aristas incidentes en él.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS

En este capítulo se discuten los resultados obtenidos de los distintos experimentos realizados, tales como los efectos encontrados al variar las distintas medidas de contingencia y las visualizaciones correspondientes a estos.

Como referencia, se toman valores de β y γ dentro de los márgenes que se reportan en la literatura para el covid-19 (Eikenberry *et al.*, 2020). Sin embargo, se resalta que el programa desarrollado en este trabajo permite ajustar estos a los que el usuario desee. Específicamente, en los siguientes experimentos se trabaja con una epidemia con una tasa de contagio $\beta = 1.5$ y una tasa de recuperación de $\gamma = 0.25$. Se realiza una comparativa entre dos tipos distintos de vacunación para determinar cuál de ellas sería mejor para controlar el esparcimiento de la epidemia, también se realizan experimentos para variar el porcentaje de población que utiliza cubrebocas y lo mismo para el aislamiento. Un último experimento se lleva a cabo variando dos medidas de contingencia simultáneamente (aislamiento y cubrebocas) en los cuatro perfiles de riesgo.

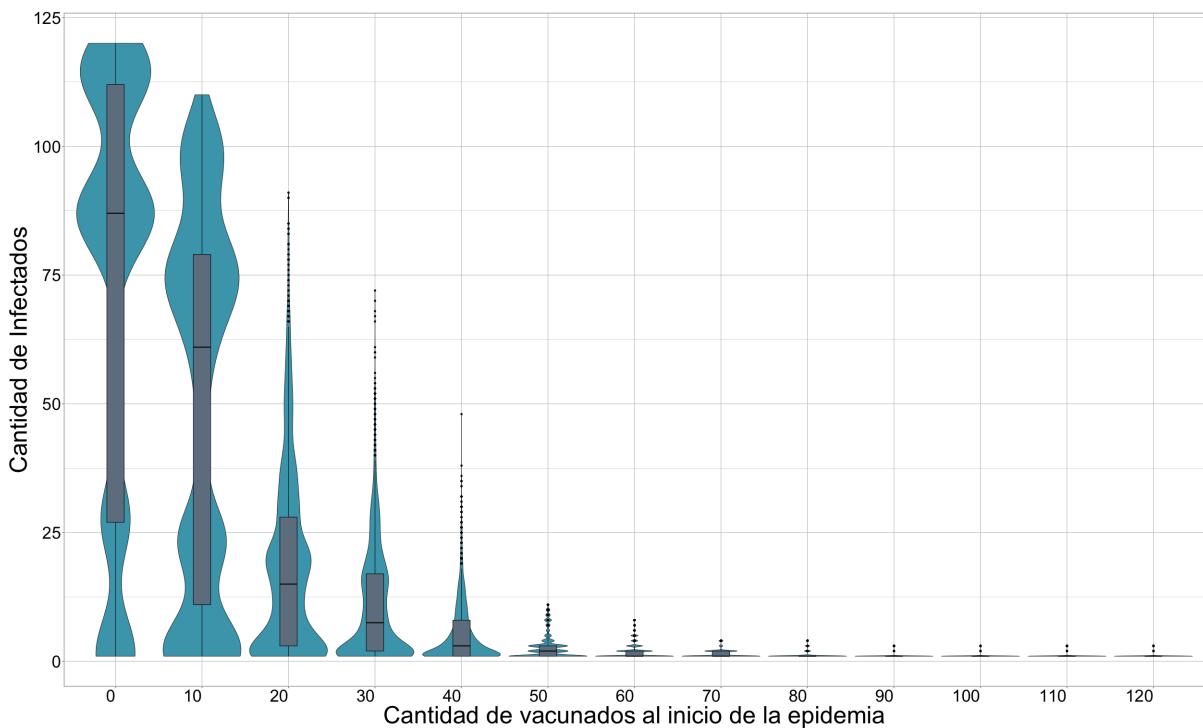


FIGURA 5.1: Vacunando a los nodos influyentes de la red.

5.1 VACUNACIÓN

Se sabe que las vacunas son una medida de contingencia efectiva contra una epidemia, lo que se quiere mostrar con este experimento es la diferencia entre la cantidad de infectados cuando se eligen distintas estrategias de vacunación.

Se trabaja con dos distintas estrategias, una es la vacunación aleatoria y la otra es tomando en cuenta los nodos que más influyen en la red. En ambos experimentos se varía la cantidad de nodos vacunados desde el inicio de la epidemia, es decir, tienen un estado de *recuperado* desde el inicio.

En la figura 5.2 tenemos los resultados de utilizar la estrategia aleatoria y en la figura 5.1 los resultados de vacunar influyentes. Como se nota en ambas, la cantidad final de infectados disminuye conforme la cantidad de vacunados crece, pero se nota que la disminución es mayor cuando se vacunan a *personas* influyentes.

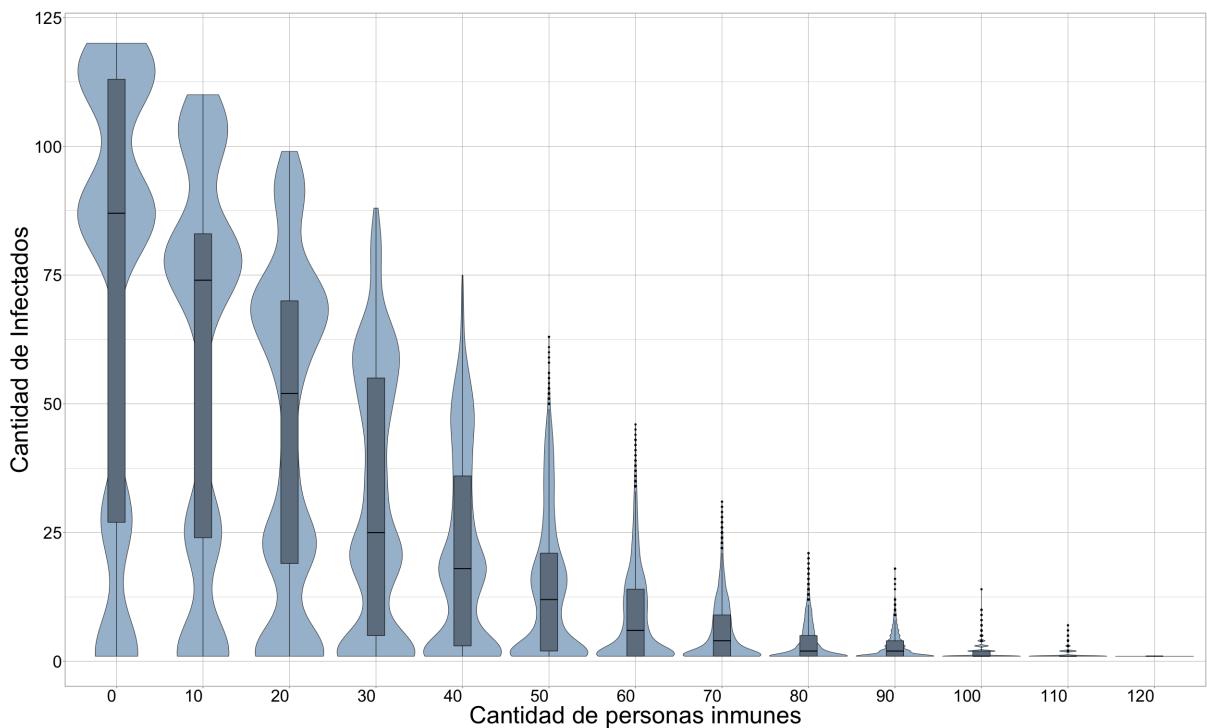


FIGURA 5.2: Vacunando nodos al azar de la red.

5.2 CUBREBOCAS

Se realiza un experimento donde se varía la cantidad de personas que utiliza cubrebocas, en la figura 5.3 se muestran los resultados obtenidos y como se disminuye la cantidad total de infectados cuando más gente utiliza esta medida de contingencia. Los nodos que poseen cubrebocas fue elegido de forma pseudo-aleatoria y se les asignó una tasa menor de contagio, en este caso de $\beta_{fm} = 1$.

5.3 AISLAMIENTO

Se identifica a los nodos en cuatro tipos distintos, referentes a su actitud ante la toma de riesgos, basados en el cuadro 4.1. Se realiza un experimento variando el porcentaje de aislamiento que toma el grupo identificado como *amantes al riesgo* para ver como afecta que no sigan las medidas de contingencia, esto se varía desde 0 %

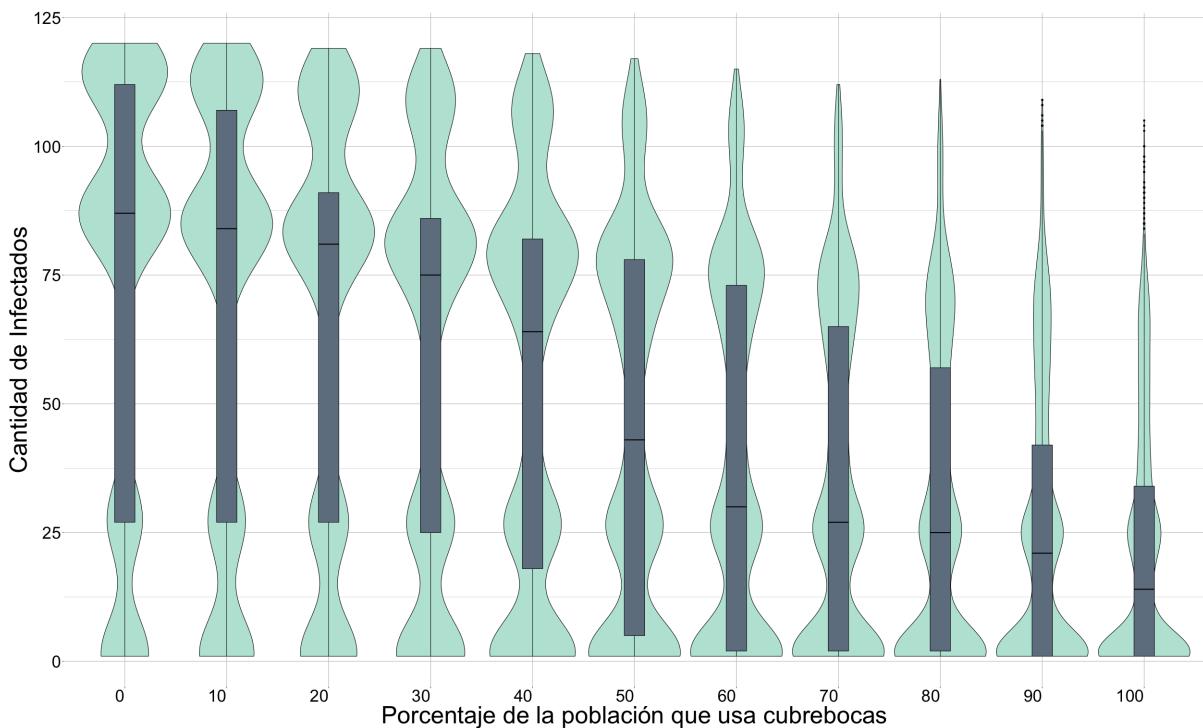


FIGURA 5.3: Cubrebocas.

al 50 % en saltos de 5. El grupo neutral al riesgo tiene un porcentaje de aislamiento del 10 %, los ligeramente aversos al riesgo tienen un porcentaje del 50 % y, por último, los altamente averso al riesgo un 90 %.

La figura 5.4 muestra como se reduce la cantidad de infectados conforme este grupo aumenta su aislamiento.

5.4 AISLAMIENTO CON CUBREBOCAS

En este caso, se trabaja con las particiones de la población en base al perfil de riesgo, proporcionado en el cuadro 4.1, para variar dos medidas de contingencia simultáneamente, el aislamiento y el uso de cubrebocas. Para el primero, se varía el porcentaje de aristas que cierra para ya no tener contacto con los vecinos; y para el segundo se toma un porcentaje de la población con el perfil seleccionado que usará cubrebocas durante todo el horizonte de tiempo simulado. Para cada uno de los

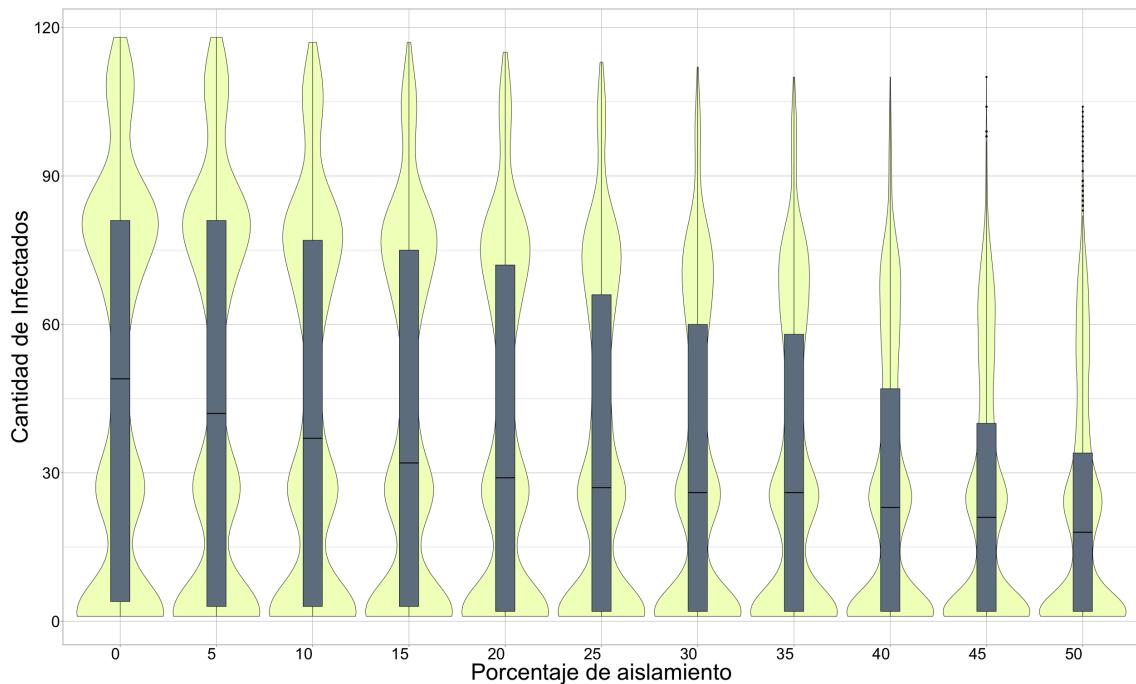
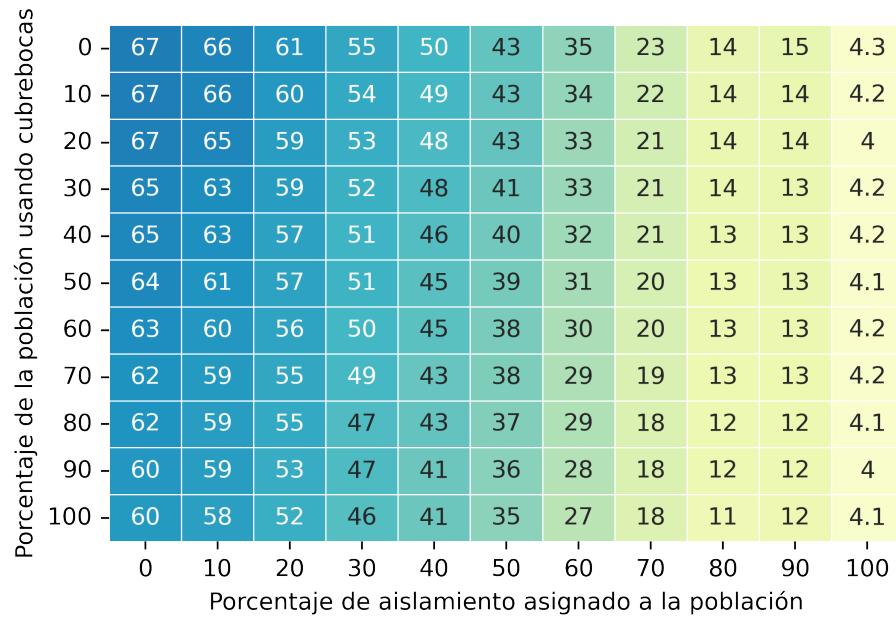


FIGURA 5.4: Aislamiento.

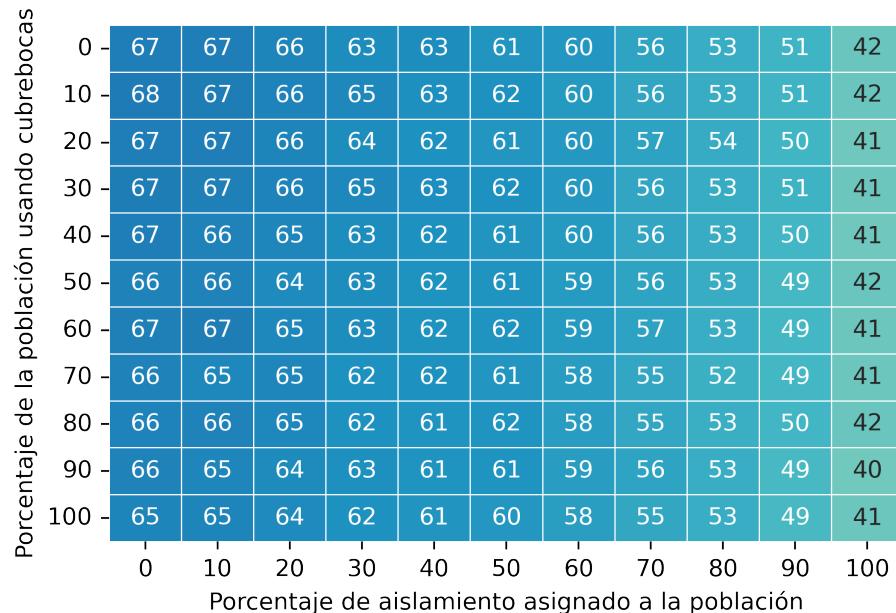
escenarios se realizan 5000 simulaciones, donde se reporta el promedio de cada uno de estos.

La figura 5.5 muestra un conjunto de cuatro mapas de calor mostrando el porcentaje total de infectados que hubo en las simulaciones variando dichas medidas de contingencia. La figura 5.5a muestra los resultados obtenidos trabajando con la población que tiene el perfil de *amantes al riesgo* (lo cuales representan a un 51.6 %), en los resultados obtenidos el mayor porcentaje de infectados fue del 67 % y un mínimo del 4 % infectados totales. Se puede apreciar que conforme este grupo de personas comienzan a cuidarse, el porcentaje de infectados disminuye considerablemente; por ejemplo, cuando se aíslan de un 30 % de sus vecinos y solo el 50 % de estos usan cubrebocas, la cantidad total de infectados es la mitad de la población total. Si en este grupo de personas, todos usaran cubrebocas y se aislan completamente, solo se infectaría un 4.1 % de la población, el cual es un valor pequeño.

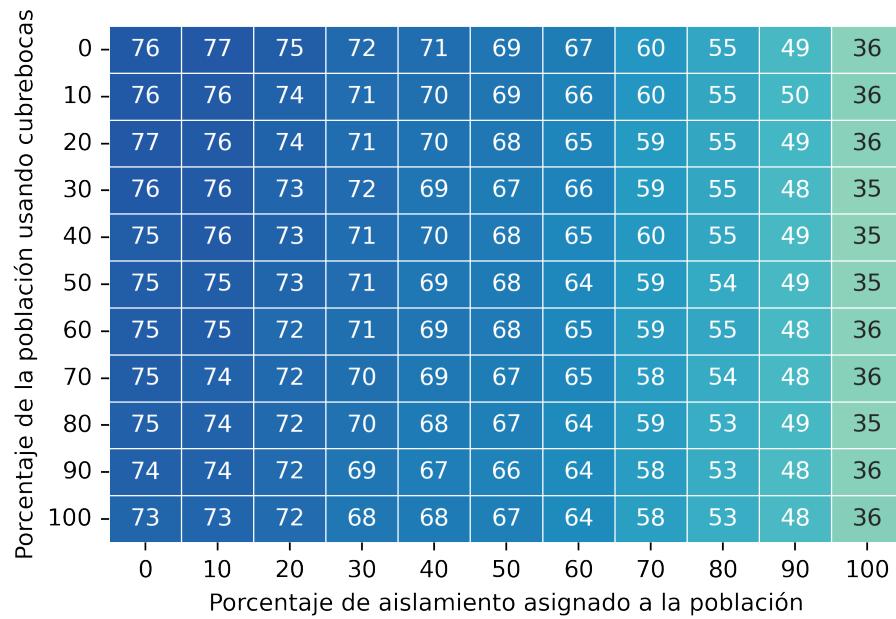
Cuando se trabaja con la población que tiene un perfil de *altamente averso al riesgo* (que representan un 9.2 % de la población) los resultados obtenidos no



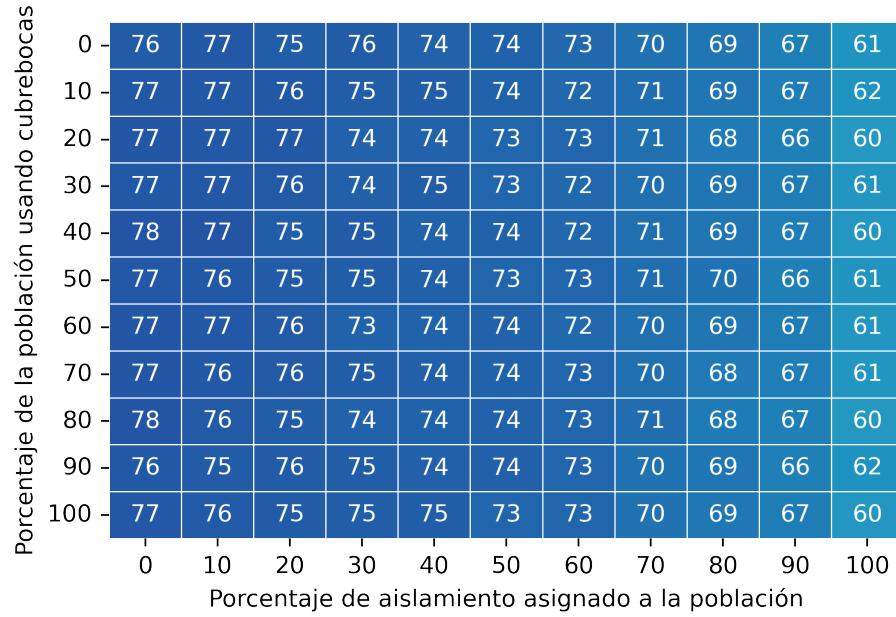
(a) Amantes al riesgo.



(b) Neutral al riesgo.



(c) Ligeramente averso al riesgo.



(d) Altamente averso al riesgo.

FIGURA 5.5: Uso de cubrebocas combinado con aislamiento.

muestran una variación visible en cuanto a los colores mostrados en la figura 5.5d, el porcentaje máximo de infectados en este escenario es de 76 % y el mínimo es de 60 %. Como este grupo de personas es pequeño, aunque se cuiden completamente, no tiene una gran repercusión en el tamaño final de infectados.

Se realizaron pruebas de correlación para determinar si las medidas de contingencia en estos experimentos en distintos escenarios afectaban al porcentaje final de infectados. Para esto, se toman los datos obtenidos y mostrados en las figuras 5.5a, 5.5b, 5.5c, 5.5d y se realizan estas pruebas por renglón y por columna respecto al porcentaje respectivo de cada medida de contingencia por separado.

En las figuras 5.7a, 5.7b, 5.7c, 5.7d se muestran los coeficientes de correlación para los porcentajes de aislamiento asignados a los diferentes tipos de población con los que se trabaja con cada uno de los porcentajes de uso de cubrebocas de la población. Como se puede apreciar en dichas figuras, estos coeficientes son cercanos al -1 en todos los casos, lo que representa que sí existe una correlación y que a mayor porcentaje de aislamiento el porcentaje final de infectados disminuye.

En la figura 5.6a se tienen los coeficientes de correlación correspondientes al porcentaje de población amante al riesgo que usa cubrebocas, como se observa, estos valores también son cercanos al -1, por lo que indica que sí hay una correlación y que a mayor porcentaje de personas usando cubrebocas el porcentaje final de infectados disminuye. En las figura 5.6b y 5.6c se aprecia como sigue habiendo una correlación inversa, pero los valores de los coeficientes empiezan a ser positivos. En la figura 5.6d, correspondiente a los experimentos realizados al tipo de población que son *altamente aversos al riesgo*, que ya no se puede decir que existe una correlación entre el uso de cubrebocas y el porcentaje final de infectados, esto es debido a que es un porcentaje de población bajo para lograr un cambio en ese porcentaje.

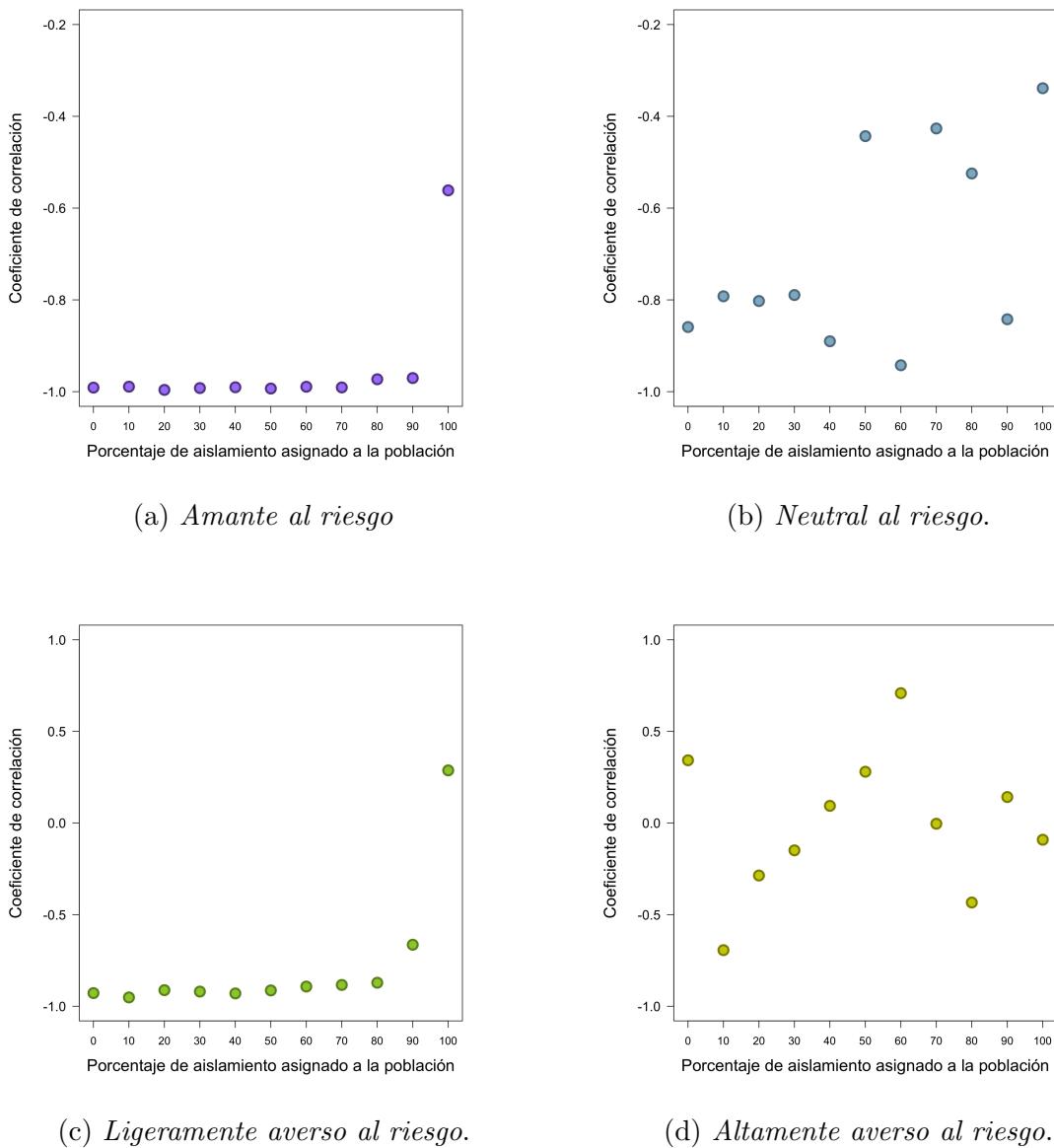


FIGURA 5.6: Coeficientes de correlación de los resultados obtenidos variando el porcentaje de las distintas poblaciones que usa cubrebocas.

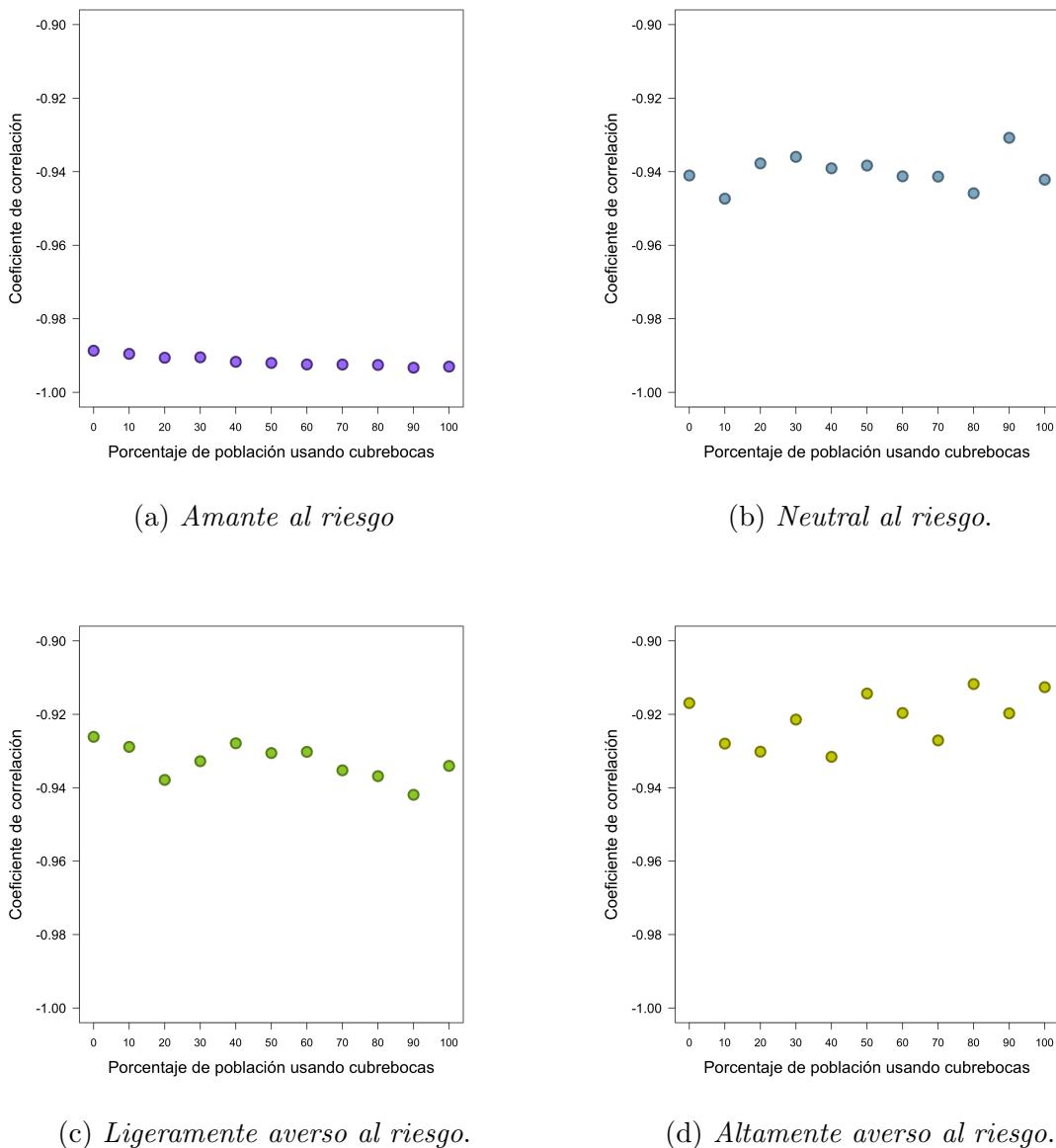


FIGURA 5.7: Coeficientes de correlación de los resultados obtenidos variando el porcentaje de aislamiento que se le asigna a las distintas poblaciones.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES

En este trabajo, se realizan simulaciones de procesos infecciosos en modelos de redes multiagentes bajo distintas medidas de contingencia, estudiando sistemáticamente los efectos de las mismas en el porcentaje final de infectados. Se observa que la incorporación de agentes con perfiles de riesgo y adopción de medidas precautorias individuales permite mitigar un proceso epidémico, impactando de forma significativa en el número de individuos que resultan contagiados al final del proceso. Dichos efectos fueron medidos estadísticamente mediante pruebas de correlación. Más aún, el programa creado permite medir cuantitativamente los efectos que distintas medidas de contingencia tienen en el número de infectados, pudiendo así ser utilizado para tomar decisiones con experimentos *in silico*.

6.1 CONTRIBUCIONES

Se trabaja para realizar simulaciones de un proceso infeccioso usando un modelo más realista, considerando una red de contactos real y añadiéndole a cada uno de los agentes uno de cuatro perfiles para identificar su comportamiento donde toda la epidemia. Con base en los resultados, descritos en el capítulo 5, obtenidos de los experimentos realizados en este trabajo, se llega a la conclusión de que las distintas medidas de contingencia que se adoptan aquí (vacunación, cubrebocas, aislamiento)

tienen un efecto positivo disminuyendo el porcentaje final de infectados. También se concluye que el porcentaje final de infectados depende en gran parte del perfil de riesgo que adopta la población, ya que conforme a los resultados obtenidos, el uso de cubrebocas y aislamiento en el grupo de población *altamente aversa al riesgo* no tenían correlación y éstas medidas no disminuían el porcentaje final de infectados.

Se concretó un programa computacional de código abierto¹ con el cuál se puede simular un proceso infeccioso, ajustando la tasa de contagio y recuperación de éste, así como las medidas de contingencia deseadas y la red subyacente de contactos. Esto potencialmente facilita la toma de decisiones para el control de epidemias.

6.2 TRABAJO A FUTURO

Este trabajo se puede generalizar a modelos compartamentales más realistas que el SIR, permitiendo añadir características específicas de la infección como inmunidad temporal o periodos asintomáticos. La metodología de dotar a los nodos con las propiedades de un agente se puede llevar a generalizaciones de grafos como redes multicapa, hipergrafos o complejos simpliciales. Otros modelos de propagación que se abordan pero que se considera como prometedor para abordar bajo esta metodología es el de la propagación de rumores o información en una población.

¹<https://github.com/fvzqa/Complex-agent-networks>

BIBLIOGRAFÍA

- Azizi, A., Montalvo, C., Espinoza, B., Kang, Y., y Castillo-Chavez, C. (2020). Epidemics on networks: Reducing disease transmission using health emergency declarations and peer communication. *Infectious Disease Modelling*, 5:12–22. doi:10.1016/j.idm.2019.11.002.
- Badham, J., Barbrook-Johnson, P., Caiado, C., y Castellani, B. (2021). Justified Stories with Agent-Based Modelling for Local COVID-19 Planning. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 24(1):8. doi:10.18564/jasss.4532.
- Bailey, N. T. J. (1975). *The mathematical theory of infectious diseases and its applications*. Griffin, London, 2nd edición.
- Ball, F., Sirl, D., y Trapman, P. (2009). Threshold behaviour and final outcome of an epidemic on a random network with household structure. *Advances in Applied Probability*, 41(3):32. doi:<https://doi.org/10.1239/aap/1253281063>.
- Bollobás, B. (1998). *Modern graph theory*, volumen 184. Springer Science & Business Media.
- Bonabeau, E. (2002). Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99:7280–7287. doi:10.1073/pnas.082080899.
- Britton, T. (2010). Stochastic epidemic models: A survey. *Mathematical Biosciences*, 225(1):24–35. doi:10.1016/j.mbs.2010.01.006.

- Britton, T. (2020). Epidemic models on social networks—With inference. *Statistica Neerlandica*, 74(3):222–241. doi:10.1111/stan.12203.
- Britton, T., Janson, S., y Martin-Löf, A. (2007). Graphs with specified degree distributions, simple epidemics, and local vaccination strategies. *Advances in Applied Probability*, 39(4):922–948. doi:10.1239/aap/1198177233.
- Cai, Y., Kang, Y., y Wang, W. (2017). A stochastic SIRS epidemic model with nonlinear incidence rate. *Applied Mathematics and Computation*, 305:221–240. doi:10.1016/j.amc.2017.02.003.
- Cerami, C., Galandra, C., Santi, G. C., Dodich, A., Cappa, S. F., Vecchi, T., y Crespi, C. (2021). Risk-aversion for negative health outcomes may promote individual compliance to containment measures in covid-19 pandemic. *Frontiers in Psychology*, 12.
- Cisneros-Velarde, P. y Bullo, F. (2020). Multi-group sis epidemics with simplicial and higher-order interactions. *arXiv:2005.11404 [physics]*. arXiv: 2005.11404.
- Danon, L., Ford, A. P., House, T., Jewell, C. P., Keeling, M. J., Roberts, G. O., Ross, J. V., y Vernon, M. C. (2011). Networks and the Epidemiology of Infectious Disease. *Interdisciplinary Perspectives on Infectious Diseases*, 2011:1–28. doi:10.1155/2011/284909.
- Eikenberry, S. E., Mancuso, M., Iboi, E., Phan, T., Eikenberry, K., Kuang, Y., Kostelich, E., y Gumel, A. B. (2020). To mask or not to mask: Modeling the potential for face mask use by the general public to curtail the covid-19 pandemic. *Infectious Disease Modelling*, 5:293–308. doi:10.1016/j.idm.2020.04.001.
- Fransson, C. y Trapman, P. (2019). SIR epidemics and vaccination on random graphs with clustering. *Journal of Mathematical Biology*, 78(7):2369–2398. doi:10.1007/s00285-019-01347-2.
- Frias-Martinez, E., Williamson, G., y Frias-Martinez, V. (2011). An Agent-Based Model of Epidemic Spread Using Human Mobility and Social Network Informa-

- tion. En *2011 IEEE Third International Conference on Privacy, Security, Risk and Trust and 2011 IEEE Third International Conference on Social Computing*, p. 57–64. IEEE. doi:10.1109/PASSAT/SocialCom.2011.142.
- Gordon, T. J. (2003). A simple agent model of an epidemic. *Technological Forecasting and Social Change*, 70(5):397–417. doi:10.1016/S0040-1625(02)00323-2.
- Grauer, J., Löwen, H., y Liebchen, B. (2020). Strategic spatiotemporal vaccine distribution increases the survival rate in an infectious disease like covid-19. *Scientific Reports*, 10(1):21594. doi:10.1038/s41598-020-78447-3.
- Hassin, R. (2021). A Simple Markovian Spreading Process with Mobile Agents. *Stochastic Systems*, 11(1):19–33. doi:10.1287/stsy.2019.0061.
- Hillier, F. S. y Lieberman, G. J. (2002). *Investigación de operaciones*. McGraw-Hill/Interamericana Editores, SA.
- Hörl, S. (2017). Agent-based simulation of autonomous taxi services with dynamic demand responses. *Procedia Computer Science*, 109:899–904. doi:10.1016/j.procs.2017.05.418.
- Höertel, N., Blachier, M., Blanco, C., Olfson, M., Massetti, M., Rico, M. S., Limosin, F., y Leleu, H. (2020). A stochastic agent-based model of the SARS-CoV-2 epidemic in France. *Nature Medicine*, 26(9):1417–1421. doi:10.1038/s41591-020-1001-6.
- Iacopini, I., Petri, G., Barrat, A., y Latora, V. (2019). Simplicial models of social contagion. *Nature Communications*, 10(1):2485. doi:10.1038/s41467-019-10431-6.
- Lashari, A. A., Serafimović, A., y Trapman, P. (2020). The duration of an \$SIR\$ epidemic on a configuration model. *arXiv:1805.05117 [math]*. arXiv: 1805.05117.
- Li, C.-H., Tsai, C.-C., y Yang, S.-Y. (2014). Analysis of epidemic spreading of an SIRS model in complex heterogeneous networks. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 19(4):1042–1054. doi:10.1016/j.cnsns.2013.08.033.

- Lipsitch, M., Finelli, L., Heffernan, R. T., Leung, G. M., y Redd, S. C. (2011). Improving the evidence base for decision making during a pandemic: The example of 2009 influenza a/h1n1. *Biosecurity and Bioterrorism*, 9(2):28. doi:10.1089/bsp.2011.0007.
- López-García, M. (2016). Stochastic descriptors in an SIR epidemic model for heterogeneous individuals in small networks. *Mathematical Biosciences*, 271:42–61. doi:10.1016/j.mbs.2015.10.010.
- Maringe, C., Spicer, J., Morris, M., Purushotham, A., Nolte, E., Sullivan, R., Rachet, B., y Aggarwal, A. (2020). The impact of the covid-19 pandemic on cancer deaths due to delays in diagnosis in england, uk: a national, population-based, modelling study. *The Lancet Oncology*, 21(8):1023—1034. doi:10.1016/S1470-2045(20)30388-0.
- Mastrandrea, R., Fournet, J., y Barrat, A. (2015). Contact patterns in a high school: A comparison between data collected using wearable sensors, contact diaries and friendship surveys. *PLOS ONE*, 10(9). doi:10.1371/journal.pone.0136497.
- Mei, S., Quax, R., van de Vijver, D., Zhu, Y., y Sloot, P. M. A. (2011). Increasing risk behaviour can outweigh the benefits of antiretroviral drug treatment on the hiv incidence among men-having-sex-with-men in amsterdam. *BMC Infectious Diseases*, 11(1):118. doi:10.1186/1471-2334-11-118.
- Mei, S., Sloot, P., Quax, R., Zhu, Y., y Wang, W. (2010a). Complex agent networks explaining the HIV epidemic among homosexual men in Amsterdam. *Mathematics and Computers in Simulation*, 80(5):1018–1030. doi:10.1016/j.matcom.2009.12.008.
- Mei, S., van de Vijver, D., Xuan, L., Zhu, Y., y Sloot, P. (2010b). Quantitatively evaluating interventions in the influenza a (h1n1) epidemic on china campus grounded on individual-based simulations. *Procedia Computer Science*, 1(1):1675–1682. doi:10.1016/j.procs.2010.04.187.

- Mei, S., Zarrabi, N., Lees, M., y Sloot, P. M. (2015). Complex agent networks: An emerging approach for modeling complex systems. *Applied Soft Computing*, 37:311–321. doi:10.1016/j.asoc.2015.08.010.
- Mei, W., Mohagheghi, S., Zampieri, S., y Bullo, F. (2017). On the dynamics of deterministic epidemic propagation over networks. *Annual Reviews in Control*, 44:116–128. doi:10.1016/j.arcontrol.2017.09.002.
- Nadini, M., Zino, L., Rizzo, A., y Porfiri, M. (2020). A multi-agent model to study epidemic spreading and vaccination strategies in an urban-like environment. *Applied Network Science*, 5(1):68. doi:10.1007/s41109-020-00299-7.
- Newman, M. (2018). *Networks*, volumen 1. Oxford University Press. doi:10.1093/oso/9780198805090.001.0001.
- Nowzari, C., Preciado, V. M., y Pappas, G. J. (2016). Analysis and Control of Epidemics: A Survey of Spreading Processes on Complex Networks. *IEEE Control Systems Magazine*, 36(1):26–46. doi:10.1109/MCS.2015.2495000.
- Ottaviano, S. y Bonaccorsi, S. (2019). Some aspects of the Markovian SIRS epidemics on networks and its mean-field approximation. *arXiv:1912.11287 [math, q-bio]*. arXiv: 1912.11287.
- Paarporn, K., Eksin, C., Weitz, J. S., y Shamma, J. S. (2015). Epidemic spread over networks with agent awareness and social distancing. En *2015 53rd Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing (Allerton)*, p. 51–57. IEEE. doi:10.1109/ALLERTON.2015.7446985.
- Pasquini-Descomps, H., Brender, N., y Maradan, D. (2017). Value for money in h1n1 influenza: A systematic review of the cost-effectiveness of pandemic interventions. *Value in Health*, 20(6):819—827. doi:10.1016/j.jval.2016.05.005.
- Pastor-Satorras, R., Castellano, C., Van Mieghem, P., y Vespignani, A. (2015). Epidemic processes in complex networks. *Reviews of Modern Physics*, 87(3):925–979. doi:10.1103/RevModPhys.87.925.

- Pellis, L., Ball, F., Bansal, S., Eames, K., House, T., Isham, V., y Trapman, P. (2015). Eight challenges for network epidemic models. *Epidemics*, 10:58–62. doi:10.1016/j.epidem.2014.07.003.
- Peng, C., Jin, X., y Shi, M. (2010). Epidemic threshold and immunization on generalized networks. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 389(3):549–560. doi:10.1016/j.physa.2009.09.047.
- Perez, L. y Dragicevic, S. (2009). An agent-based approach for modeling dynamics of contagious disease spread. *International Journal of Health Geographics*, 8(1):50. doi:10.1186/1476-072X-8-50.
- Rincón, L. (2007). Procesos estocásticos. *Departamento de Matemáticas, Facultad de Ciencias de la UNAM*.
- Ross, S. M. (2014). *Introduction to probability models*. Academic press.
- Ruhi, N. A. y Hassibi, B. (2015). SIRS epidemics on complex networks: Concurrency of exact Markov chain and approximated models. En *2015 54th IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, pp. 2919–2926, Osaka. IEEE. doi:10.1109/CDC.2015.7402660.
- Samitas, A., Polyzos, S., y Siriopoulos, C. (2018). Brexit and financial stability: An agent-based simulation. *Economic Modelling*, 69:181–192. doi:10.1016/j.econmod.2017.09.019.
- Silva, P. C., Batista, P. V., Lima, H. S., Alves, M. A., Guimarães, F. G., y Silva, R. C. (2020). COVID-ABS: An agent-based model of COVID-19 epidemic to simulate health and economic effects of social distancing interventions. *Chaos, Solitons & Fractals*, 139:110088. doi:10.1016/j.chaos.2020.110088.
- Spricer, K. y Britton, T. (2019). An SIR epidemic on a weighted network. *Network Science*, 7(4):556–580. doi:10.1017/nws.2019.54.

- Tewelde medhin, E., Marwala, T., y Mueller, C. (2004). Agent-based Modelling: A Case Study in HIV Epidemic. En *Fourth International Conference on Hybrid Intelligent Systems (HIS'04)*, pp. 154–159. doi:10.1109/ICHIS.2004.16.
- Trapman, P. y Bootsma, M. C. J. (2009). A useful relationship between epidemiology and queueing theory: The distribution of the number of infectives at the moment of the first detection. *Mathematical Biosciences*, 219(1):15–22. doi:10.1016/j.mbs.2009.02.001.
- Van Mieghem, P., Omic, J., y Kooij, R. (2009). Virus Spread in Networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 17(1):1–14. doi:10.1109/TNET.2008.925623.
- Zheng, L. y Tang, L. (2019). A Node-Based SIRS Epidemic Model with Infective Media on Complex Networks. *Complexity*, 2019:1–14. doi:10.1155/2019/2849196.
- Zhong, X., Guo, S., y Peng, M. (2017). Stability of stochastic SIRS epidemic models with saturated incidence rates and delay. *Stochastic Analysis and Applications*, 35(1):1–26. doi:10.1080/07362994.2016.1244644.

RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

Ericka Fabiola Vázquez Alcalá

Candidato para obtener el grado de
Maestría en Ciencias de la Ingeniería
con orientación en Sistemas

Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Tesis:

**SIMULACIÓN DE EPIDEMIAS
BAJO MEDIDAS DE CONTINGENCIA**

Nací el 29 de octubre de 1994 en la ciudad de Monterrey, Nuevo León; mis padres son Fidel Vázquez Ayala(†) y María Sanjuana Alcalá Espinosa. En 2016 egresé como Licenciada en Matemáticas en la Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas de la Universidad Autónoma de Nuevo León.