

ANÁLISIS DE MODELOS MATEMÁTICOS DE PREDICCIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE EPIDEMIAS EN GRUPOS SOCIALES MEDIANTE DE SIMULACIÓN BASADA EN AGENTES

ANALYSIS OF MATHEMATICAL MODELS OF PREDICTION OF THE BEHAVIOR OF EPIDEMICS IN SOCIAL GROUPS THROUGH AGENT-BASED SIMULATION

Efraín De La Hoz Granadillo¹
Ludys López Polo²

RESUMEN

En la presente investigación, se realiza un análisis de modelos matemáticos de predicción del comportamiento de epidemias en grupos sociales, mediante una modelación experimental para la propagación de un brote de epidemias. Para lo anterior, se revisaron diferentes modelos matemáticos y de simulación, con lo cual se desarrollaron escenarios que incluyen el análisis de medidas preventivas, mediante una simulación basada en agentes que permitió la proyección de los escenarios experimentales en el manejo de epidemias y su impacto en el contexto social. Los resultados muestran el impacto positivo que tiene el uso de la simulación basada en agentes en el diseño y evaluación de estrategias de control del comportamiento de enfermedades contagiosas en grupos sociales y la orientación para la toma de decisiones en la implementación de medidas de organismos gubernamentales.

PALABRAS CLAVE

Simulación basada en agentes, grupos sociales, modelos de comportamiento propagación epidémica

ABSTRACT

In the present investigation, an analysis of mathematical models of prediction of the behavior of epidemics in social groups is carried out through an experimental modeling for the propagation of an outbreak of epidemics. For the above, different mathematical and simulation models were reviewed, which developed scenarios that included the analysis of preventive measures, through an agent-based simulation that allowed the projection of the experimental scenarios in the management of epidemics and their impact on the social context. The results show the positive impact of the use of agent-based simulation in the design and evaluation of strategies to control the behavior of contagious diseases in social groups and the orientation for decision-making in the implementation of measures of government agencies.

KEYWORDS

Agent-based simulation, social groups, behavioral patterns epidemic spread

Fecha de recepción: 31 de mayo de 2016.

Fecha de evaluación: 29 de junio de 2016.

Fecha de aceptación: 2 de agosto de 2016.

1 Ph.D en Ingeniería Industrial, Docente de planta Programa Administración Industrial-Universidad de Cartagena. Correo electrónico: edelahoze@unicartagena.edu.co

2 Magister en Administración de empresas e innovación, Docente Programa Ingeniería Industrial-Universidad Simón Bolívar. Correo electrónico: lulopez@unisimonbolivar.edu.co

INTRODUCCIÓN

El análisis de epidemias de enfermedades infecciosas que afecta a la sociedad es un tema que ha tomado importancia en las ciencias sociales, caracterizándolo como un factor que genera pánico en la población e incide de manera directa en las relaciones cotidianas de los seres humanos (Tirado & Cañada, 2011). Anualmente, alrededor de 13 millones de seres humanos mueren en el mundo por causas asociadas a enfermedades infecciosas configurándose esto en un problema de salud pública (Herrera & González, 2012). En este contexto, un interrogante planteado ante la aparición y propagación de una epidemia es que porcentaje de la población se verá afectada y si finalmente se podrá controlar y eliminar.

En respuesta a esta problemática, se han propuesto distintos enfoques o modelos que intentan brindar información valiosa para la toma de decisiones que conduzcan al control de su propagación (Hethcote, 2000; Murray, 2002).

Modelación matemática de epidemias simples. Autores como Chamorro (2002), han mostrado la aplicación de la modelación matemática y estadística para hacer predicciones en el comportamiento de contagio de enfermedades, a partir de ecuaciones diferenciales, que representan la velocidad a la que se transmite la enfermedad (Chamorro, 2002; Kasereka, Kasoro & Chokki, 2014).

Modelo SIR (Susceptible-Infeccioso-Recuperado). El modelo susceptible-infeccioso-recuperado (SIR) es uno de los más utilizado en el análisis de enfermedades infecciosas, el cual contempla la inmunidad a la enfermedad una vez que el individuo la ha padecido y se ha recuperado (Hethcote, 2000; Murray, 2002). En este modelo se identifican tres grupos poblacionales: Los susceptibles $S(t)$, compuesto por los individuos sanos que pueden contraer o contagiarse de la enfermedad; el grupo de los infecciosos $I(t)$ constituido por los individuos que padecen la enfermedad y el grupo de los recuperados $R(t)$, que son los individuos que padecieron la enfermedad y se han sanado, adquiriendo una condición de inmunidad ante nuevos

contagios de la enfermedad. El crecimiento o desarrollo de estos grupos poblacionales puede representarse mediante el sistema de ecuaciones diferenciales expresado por las ecuaciones 1, 2 y 3:

$$\frac{dS(t)}{dt} = -c\beta s(t) \frac{I(t)}{N(t)} \quad \text{Ecuación 1.}$$

$$\frac{dI(t)}{dt} = c\beta s(t) \frac{I(t)}{N(t)} - \gamma I(t) \quad \text{Ecuación 2.}$$

$$\frac{dR(t)}{dt} = \gamma I(t) \quad \text{Ecuación 3.}$$

Siendo $\frac{dS(t)}{dt}$ la tasa de reducción de los individuos sanos, $\frac{dI(t)}{dt}$ la tasa de crecimiento de los individuos infectados, $\frac{dR(t)}{dt}$ la tasa de crecimiento de los individuos recuperados, $N(t)$ es la población total en el tiempo t , β es la tasa de contagio, c el número promedio de contactos de cada individuo por unidad de tiempo y γ es la tasa de recuperación.

Modelo SIS (Susceptible-Infeccioso-Susceptible). Este modelo, a diferencia del anterior contempla la posibilidad de que un individuo adquiera nuevamente la enfermedad. Es representado mediante el siguiente sistema de ecuaciones diferenciales (ecuaciones 4 y 5), las cuales describen la evolución en el tiempo de las clases de individuos susceptibles e infectados, con N constante (Saldaña, 2010).

$$\frac{dS(t)}{dt} = -c\beta s(t) \frac{I(t)}{N(t)} + \gamma I(t) \quad \text{Ecuación 4.}$$

$$\frac{dI(t)}{dt} = c\beta s(t) \frac{I(t)}{N(t)} - \gamma I(t) \quad \text{Ecuación 5.}$$

Modelo de causalidad del triángulo epidemiológico. Este modelo plantea la relación que existe entre el huésped, el agente y el ambiente como componentes que intervienen en la transmisión de una epidemia. El huésped lo constituye el individuo susceptible de infectarse, el agente es el organismo vivo capaz de producir la enfermedad y el ambiente está representado por las condiciones externas que facilitan o dificultan la exposición del huésped al agente. (Winters & Zaia, 2006).

Simulación Basada en Agentes SBA. La SBA, permite representar las características y reglas de interacción entre los individuos de un sistema social, así como las propiedades del entorno de manera que a partir de la interacción de estas estructuras se puedan estudiar o analizar propiedades y comportamientos emergentes del sistema social (Herrera & Barros, 2005).

El análisis de estas interacciones fue estudiado por Quezada y Cannesa (2010), quienes expresaron que la SBA es una herramienta que responde a problemas caracterizados por un comportamiento tipo “Bottom Up”, es decir, sistemas que observan comportamientos emergentes a partir del comportamiento individual de los actores sociales, en el que el actuar de cada sujeto ejerce perturbación mutua con el resto de la población. Lo anterior, ha llevado su aplicación en el área de las Ciencias Sociales en el estudio del comportamiento agregado de los individuos de un sistema y el análisis de su comportamiento individual (Arrow, McGrath & Berdahl, 2000), así como en el análisis del comportamiento de factores asociados al desarrollo de economías en un contexto social (De La Hoz, Fontalvo Herrera, & Vergara, 2013)

METODOLOGÍA

La presente investigación se enmarca en una concepción epistémica racionalista y empirista dado que se desarrolla un proceso de análisis y construcción del conocimiento a partir de la interpretación y argumentación teórica y el análisis experimental de escenarios en la propagación de epidemias en grupos sociales, mediante la SBA se evalúan escenarios contemplados en la presente investigación. Así mismo, la investigación es de tipo cualitativo y cuantitativo, dado que obedece a un paradigma inductivo y deductivo del método, a partir del cual se analizan y argumentan los planteamientos de la presente investigación.

Operacionalización de las variables del modelo. Considerando que la propagación de la epidemia es un fenómeno que obedece a un análisis del contagio de agentes sociales, este se puede modelizar mediante variables discretas, con la variable tiempo definida como una variable continua.

Para la operacionalización del modelo, se definieron las siguientes variables: S(t): Individuos sanos en el tiempo t que pueden contraer o contagiarse de la enfermedad, L(t): Individuos que han contraído la enfermedad y que manifiestan síntomas en el tiempo t, I(t): Individuos que padecen la enfermedad en el tiempo t, R(t): Individuos sanos en el tiempo t que padecieron la enfermedad y se han recuperado, pero que pueden volver a contraer la enfermedad.

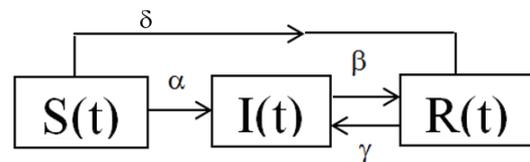
Escenarios estudiados. En esta investigación para la comprensión y estudio de los modelos de propagación de epidemias infecciosas y su impacto en el contexto social se desarrolló una SBA en el software Netlog 5.1.0. en el que se analizaron cuatro escenarios de propagación de epidemias como son: el Modelo de epidemia básico, Modelo de epidemia con infección latente L(t), el Modelo de epidemia con infección latente y recuperación con cuarentena Q(t) y el Modelo de epidemia con infección latente y recuperación con tratamiento.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Modelo de epidemia básico:

En este modelo, se definieron tres clases de individuos S(t), I(t) y R(t). Bajo este escenario es la tasa de contagio por primera vez, β es la tasa de recuperación de los individuos infectados, γ es la tasa de infección de individuos que en el pasado tuvieron la enfermedad, δ es la tasa de individuos sanos que no han padecido la enfermedad pero que estuvieron expuestos a ella. A continuación en la Figura 1, se muestra el diagrama de flujo del modelo básico.⁶

Figura1. Modelo de epidemia básico

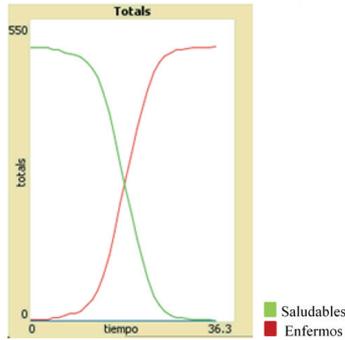


Fuente: Elaboración propia de los autores.

Los resultados de la simulación SBA, muestran que bajo estas condiciones, existe un corto periodo en el que la propagación de la epidemia es

lenta, seguida de un rápido crecimiento exponencial en el número de enfermos. Lo anterior permite analizar que en condiciones alta interacción y concentración de la población, se deben manejar controles altamente eficientes, con manejo de protocolos rápidos y rigurosos que logren identificar y aislar individuos que padecen la enfermedad. En la Figura 2 se muestran los resultados de la simulación SBA

Figura 2. Resultados modelo de epidemia básico

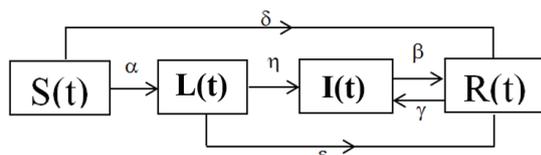


Fuente: Elaboración propia de los autores.

Modelo de epidemia con infección latente L(t):

En este escenario, se incorpora el estado de infección latente L(t). Donde el individuo para pasar de individuo sano susceptible de contagiarse S(t) a Infeccioso I(t) en el que exhibe claramente los síntomas o se le ha diagnosticado la enfermedad, pasa por un estado de latente L(t) de la enfermedad en la que no se han manifestado los síntomas. En la Figura 3, se muestra el diagrama de flujo asociado a esta situación donde η representa la proporción de individuos contagiados que finalmente manifiestan la enfermedad y ε la proporción de individuos contagiados que se recuperan sin desarrollar la enfermedad.

Figura 3. Modelo de epidemia con infección latente L(t)

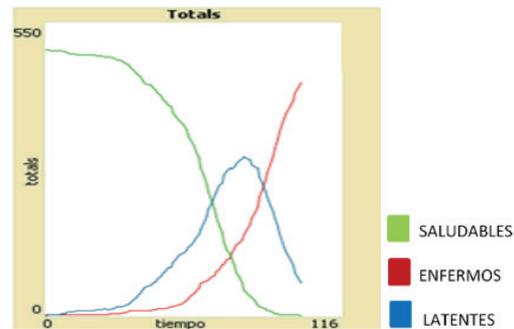


Fuente: Elaboración propia de los autores.

Para el caso con infección latente se desarrollaron 10 simulaciones o corridas obteniéndose que en promedio el tiempo de propagación de la epidemia se triplica en comparación con el modelo básico. Así mismo, se observa un lapso de tiempo mayor durante el cual la propagación de la infección es lenta en comparación con el modelo de epidemia básico. Se infiere entonces que la extensión del periodo de incubación de la enfermedad es un factor determinante en la rapidez con la cual una enfermedad epidémica se propaga, este resultado es importante en la medida que proporciona información valiosa para la implementación de planes de respuesta ante el brote de una enfermedad potencialmente epidémica.

En la Figura 4, se ilustra el comportamiento del modelo de epidemia con infección latente L(t).

Figura 4. Modelo de epidemia con infección latente



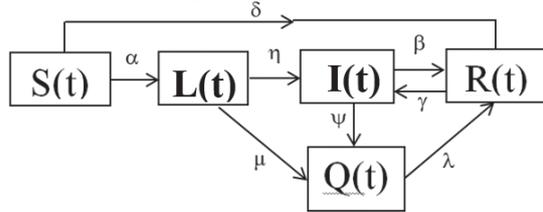
Fuente: Elaboración propia de los autores.

Modelo de epidemia con infección latente y recuperación con cuarentena Q(t):

En este escenario, se contempla la condición de cuarentena Q(t) en el tiempo t, tanto para individuos que desarrollan la enfermedad, como para los que tienen la enfermedad en estado latente. En la Figura 5 se presenta el diagrama de flujo del modelo. En este escenario, μ representa la fracción de los infectados que pasan a ser aislados, ψ la proporción de enfermos que son aislados y λ la proporción de individuos que pasan a la condición de enfermos que han sanado R(t).

Para este caso, nuevamente se realizaron 10 corridas o simulaciones, los resultados muestran que en promedio el periodo de propagación total se incrementa lo que muestra una reducción

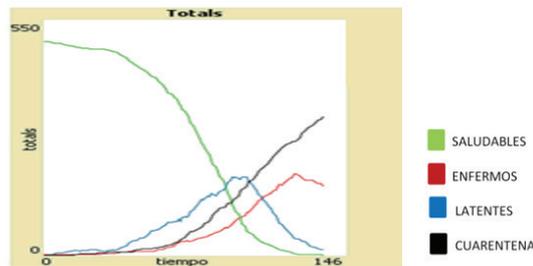
Figura 5. Modelo de epidemia con infección latente y recuperación con cuarentena



Fuente: Elaboración propia de los autores.

de la tasa de contagios, lográndose mejores niveles de control y contención de enfermedad. Adicionalmente, los resultados evidencian que esta estrategia por si sola logra controlar la epidemia. La Figura 6 muestra el impacto positivo de la cuarentena al controlarse la tasa de crecimiento de enfermos.

Figura 6. Modelo de epidemia con infección latente y recuperación con cuarentena



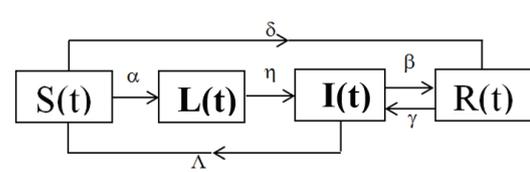
Fuente: Elaboración propia de los autores.

Modelo de epidemia con infección latente y recuperación con tratamiento:

En este escenario, se analiza el impacto que tiene el suministro de antídotos para el tratamiento de la epidemia y su resultado en la propagación de la enfermedad en un grupo social. La Figura 7 presenta el diagrama de flujo del modelo, donde el parámetro Λ representa la proporción de individuos a los que se aplica el tratamiento, adquiriendo la condición de susceptibles con el riesgo de volver a infectarse.

En el caso del modelo de recuperación con tratamiento, se hicieron 10 corridas de 1000 unidades de tiempo cada una. Se observa bajo estas condiciones, el modelo se estabiliza, lográndose controlar la propagación de la infección (Ver Figura 8). Se concluye entonces que bajo una

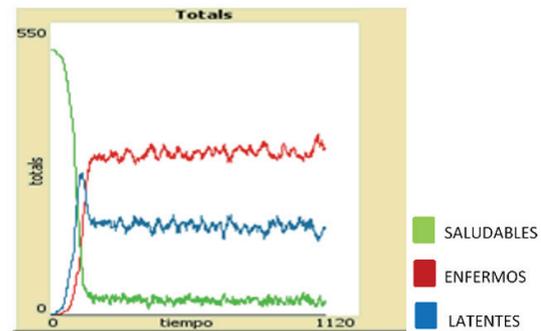
Figura 7. Modelo de epidemia con infección latente y recuperación con tratamiento



Fuente: Elaboración propia de los autor

condición de recuperación a partir del suministro de un tratamiento que sirva de antídoto, se logra controlar la propagación de la epidemia.

Figura 8. Modelo de epidemia con infección latente y recuperación con tratamiento



Fuente: Elaboración propia de los autores.

CONCLUSIÓN

Los modelos de simulación son importantes para poder planificar y tomar decisiones en la utilización de los recursos orientados al control en la propagación de epidemias. Así mismo, permiten evaluar los resultados en la implementación de estrategias dirigidas a evitar el crecimiento del número de enfermos en la población.

En esta investigación se utilizó la simulación basada en agentes para valorar los resultados en el análisis de modelos de propagación y control de epidemias. Se logró mostrar que en un brote de epidemia, medidas como la cuarentena contribuyen a reducir la tasa a la cual se propaga la enfermedad, pero que es poco efectiva en el control del crecimiento del número de individuos enfermos sobre todo en condiciones donde exista alta densidad demográfica lo cual favo-

rece una mayor conectividad entre los individuos, tal como lo plantean Herrera y González (2012). Así mismo, los resultados de la investigación muestran el impacto positivo que tiene el manejo de la salud pública, en la implementación de protocolos médicos para el diagnóstico temprano de pacientes con la enfermedad, que permitan un rápido tratamiento, así como la implementación de políticas y programas de estado que faciliten el acceso de este a la población vulnerable.

Finalmente, como resultado de la investigación, se valoró la importancia de la simulación basada en agentes en el diseño y evaluación de estrategias para el control en la propagación de enfermedades y contagios emergentes. Los resultados permiten orientar a los responsables de la toma de decisiones del estado y organizaciones no gubernamentales comprender e iden-

tificar oportunidades de mejora en implementación de medidas que minimicen el impacto en la difusión de epidemias en un determinado grupo social, lo anterior reafirma los planteamientos que en este sentido hacen Herrera y González (2012).

Como complemento a esta investigación es de interés contrastar los resultados con técnicas como la dinámica de sistema y desarrollar escenarios que incluyan condiciones como la inmunidad de individuos que han padecido la enfermedad, así como el efecto que tendría el suministro de vacunas desarrolladas para aumentar la inmunidad de los individuos a la enfermedad. Estas líneas de investigación pueden suministrar información que mejoren la prevención de la propagación de epidemias en un grupo social.

REFERENCIAS

- Arrow, H., McGrath, J. E., & Berdahl, J. (2000). *Small Groups as Complex Systems: Formation, Coordination, Development and Adaptation*. London: SAGE.
- Chamorro, A. (2002). Modelación matemática de epidemias simples *Revista Facultad Nacional de Salud Pública*, 20(1), 161-183.
- De La Hoz, E., Fontalvo Herrera, T., & Vergara, J. C. (2013). Análisis de Distribución de la Riqueza en Función del Intervalo de Renovación de los Recursos Naturales Mediante Simulación Basada en Agentes. *Ingeniare, Universidad Libre-Barranquilla*, 8(14), 31-42.
- Esteinou, R. & Barros, M. (2005). Análisis del Cambio Socio Cultural. *Colección: publicaciones de la Casa Chata*. ISBN: 968-496-553-2. México. pp.87.
- Herrera, J. & González, G. (2012). Modelado de enfermedades contagiosas mediante una clase de redes sociales dinámicas. *Rev. Fac. Ing. UCV*, 27(2).
- Hethcote, H. (2000). The Mathematics of Infectious Diseases. *Siam Review*, 42, 599-653.
- Kasereka, S. Kasoro, N. & Chokki, A. 2014. A hybrid model for modeling the spread of epidemics: Theory and simulation, *IEEE Conference Publications*, 1-7. DOI: 10.1109/ISKO-Maghreb.2014.7033457
- Saldaña, J. (2010). La modelización de la propagación de epidemias. *Matematicalia, Revista digital de divulgación matemática*. 6(2), 1-8.
- Tirado, F. & Cañada, J. (2011). Epidemias: un nuevo objeto sociotécnico. *Convergencia Revista de Ciencias Sociales*. 18(56), 133-156.
- Winters, T. & Zaia, A. (2006). Transmisión de Enfermedades e investigación de epidemias. *Epidemiología y bioestadística*. 79-93. ISBN: 978-84-8174-950-2.