

Simulación del comportamiento de la COVID-19 por medio de dinámica de sistemas en Bogotá D.C.

Simulation of the Behavior of COVID 19 by Means of System Dynamics in Bogota D.C.

Oscar Mauricio Gelves Alarcón¹ Elisa del Carmen Navarro Romero ²

¹Orcid. <https://orcid.org/0000-0003-0557-775X> Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá D.C Colombia, oscar.gelves@unimilitar.edu.co

²Orcid. <https://orcid.org/0000-0002-0255-095X> Universidad Santo Tomas, Bogotá D.C, Colombia, elisaanavarro@usantotomas.edu.co

Fecha de recepción: 13/01/2021 - Fecha de aceptación del artículo: 13/04/2021



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-No comercial-SinObraDerivada 4.0 internacional.

DOI: <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.17092>

Cómo citar: Gelves Alarcón, O. M. ., & Navarro Romero, E. del C. (2021). Simulación del comportamiento de la COVID-19 por medio de dinámica de sistemas en Bogotá D.C. Avances: Investigación En Ingeniería, 18(1). <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.17092>

Resumen

La pandemia ocasionada por la COVID-19 ha sido uno de los eventos más recientes que ha afectado la sociedad humana en sus aspectos sociales, económicos, culturales y educativos. El objetivo de este artículo fue, a partir de un modelo de simulación continua por medio de la dinámica de sistemas, definir el comportamiento y la evolución de la pandemia por COVID-19 en la ciudad de Bogotá. Se tomaron los datos de Salud Data respecto a la cantidad de contagios y muertes durante el año de pandemia, según los modelos teóricos de Kermarck, SIC y los conceptos de dinámica de sistemas y se procedió a la simulación del modelo propuesto en el software Vensim. Entre los resultados de la simulación en un periodo de 24 meses se observó un total de 993.421 contagios, los cuales son más altos que los registrados por Salud Data. Además, se propusieron dos escenarios con los cambios de la probabilidad de contagio y la interacción promedio de las personas, lo cual valida que un aumento de estos factores acelera los contagios y la cantidad de muertes relacionadas con la COVID-19 .

Palabras clave: COVID-19, dinámica de sistemas, modelo epidemiológico, simulación continua, sistema de salud.

Abstract

The pandemic caused by COVID-19 has been one of the most recent events that has affected human society in different social, economic, cultural and educational aspects. This document aims to design a continuous simulation model through the System Dynamics to define the behavior and evolution of the COVID-19 pandemic in the city of Bogotá DC. For this study, health data was taken regarding the number of infections and deaths during the year of pandemic, based on the theoretical models of Kermarck, SIC and the concepts of System Dynamics. The simulation model was development in the Vensim software. The results obtained by the simulation in a period of 24 months, a total of 993.421 infections were observed. Two scenarios are proposed with changes in the probability of contagion and the average interaction of people where it is validated that an increase in these factors accelerates the levels of infections and the number of deaths related to COVID-19.

Keywords: COVID-19, system dynamics, epidemiological model, continuous simulation, health system.

Introducción

El virus por SARS-CoV-2 o COVID-19 es una enfermedad que generó fuertes impactos durante 2020 en los sistemas de salud, así como en los ámbitos económicos y sociales. El 31 de diciembre de 2019, la Organización Mundial de Salud fue notificada de una neumonía atípica proveniente de la provincia de Wuhan (China), y desde ese momento el virus se ha expandido por todos los continentes y generado que varios países se conviertan en epicentros de la epidemia [1]. En la figura 1 se muestra el desarrollo de la enfermedad durante 2020.

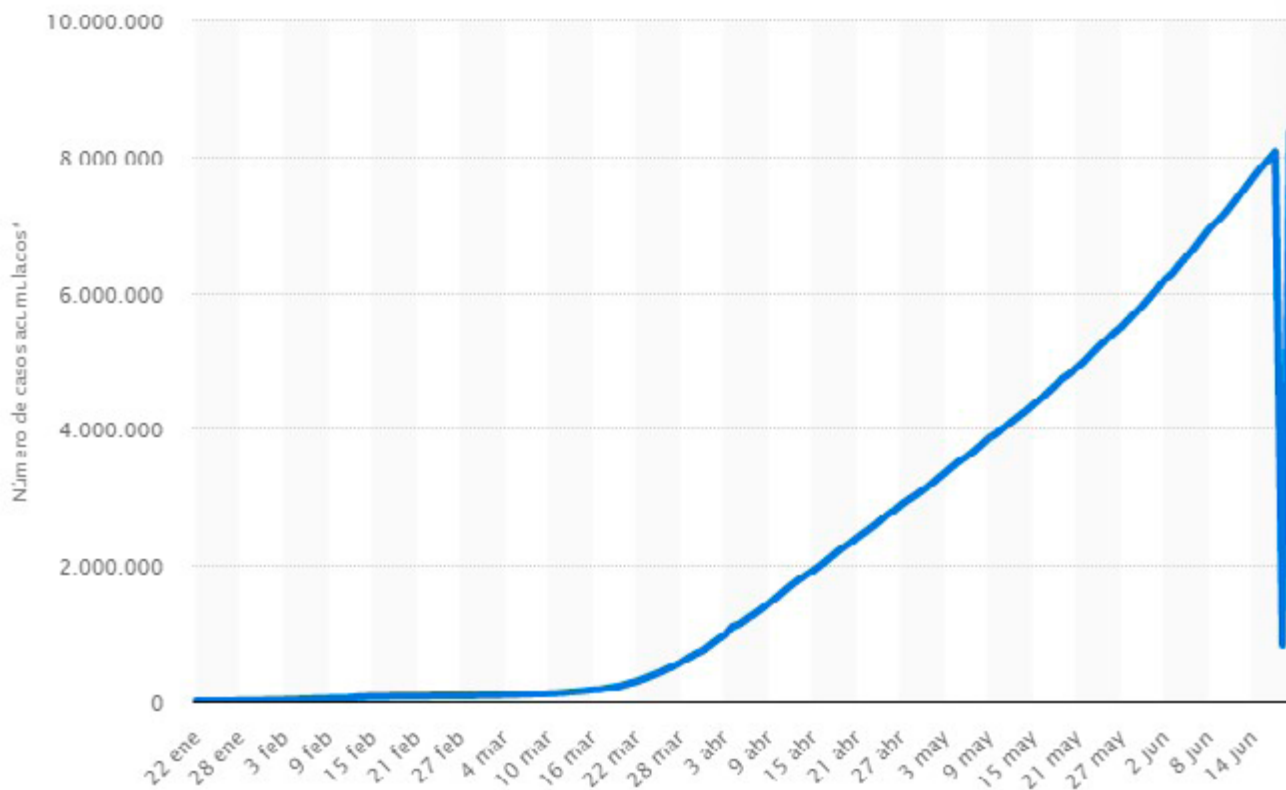


Figura 1. Número de casos acumulados de COVID-19 desde el 22 de enero hasta el 14 de junio de 2020. Fuente: [2].

La COVID-19, según la Asociación Colombiana de Infectología [3], se presenta en dos tipos de poblaciones: asintomáticos y sintomáticos. Los síntomas más recurrentes son tos seca, dificultad respiratoria, cansancio y fiebre mayor a 38°C; además, se puede detectar por pruebas moleculares para SARS-CoV-2. Debido al virus, se pueden generar enfermedades como:

- Nivel bajo de neumonía.
- Neumonía avanzada.
- Dificultad respiratoria aguda.
- Septicemia.
- Choque séptico.

El virus afecta a todos los rangos de edad; pero las complicaciones debido a las enfermedades generadas por el virus se presentan, sobre todo, en los mayores de 60 años. En la figura 2 se señala la tasa de letalidad en Colombia.

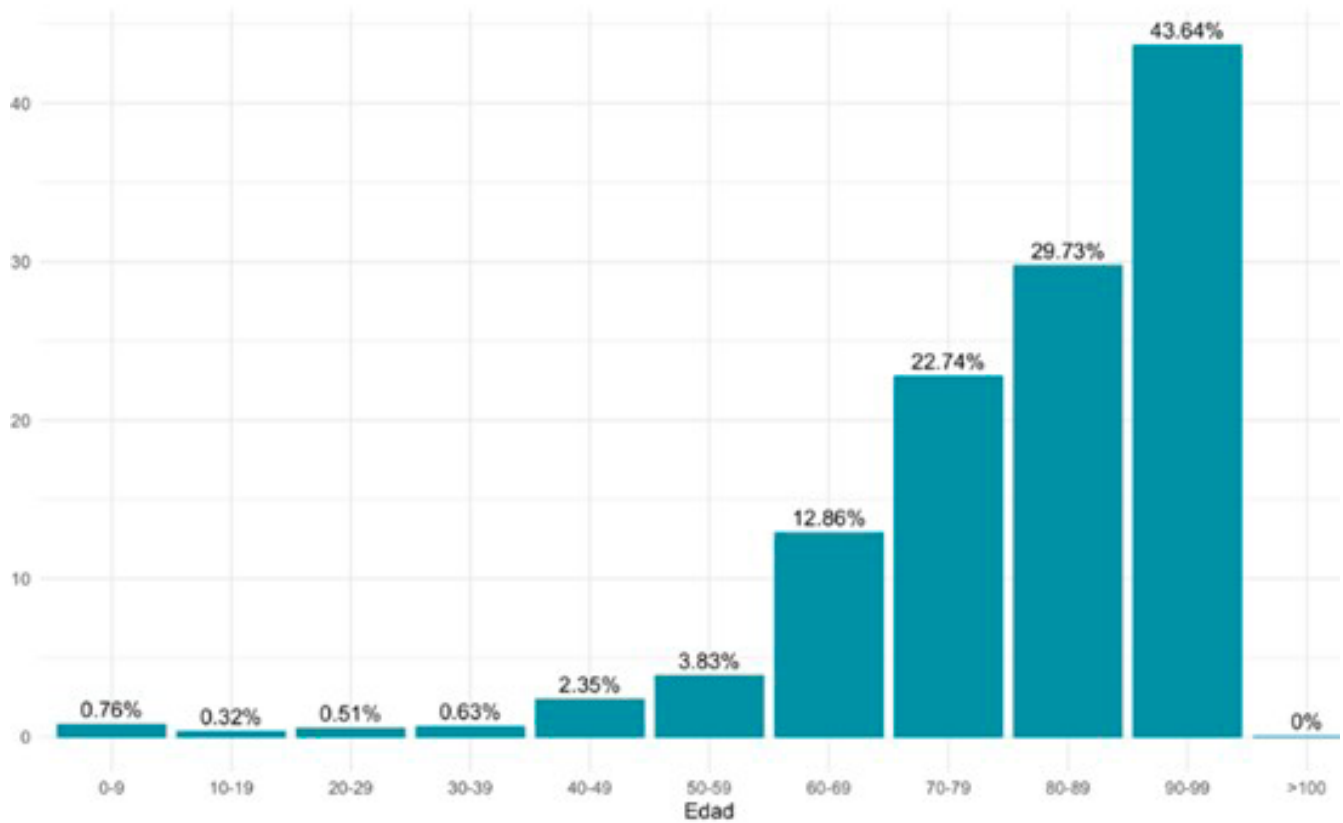


Figura 2. Tasa de letalidad de la COVID-19 por rango de edades. Fuente: [4].

Según el Ministerio de Salud y Protección Social [5], en la ciudad de Bogotá se registró el primer caso de COVID-19 el 6 de marzo de 2020, en una persona de 19 años que llegó procedente de Milán (Italia). Desde ese momento, el Gobierno nacional, junto con el gobierno distrital, ha tenido una política de confinamiento para evitar los contagios y el colapso de las unidades de cuidados intensivos (UCI). La figura 3 detalla la evolución de la enfermedad en la ciudad de Bogotá desde marzo hasta junio de 2020.



Figura 3. Casos diarios confirmados en la ciudad de Bogotá D.C. Fuente: [6].

Por medio de modelos matemáticos se ha logrado simular y predecir el comportamiento de diferentes enfermedades infecciosas y virales, y a continuación se presenta el desarrollo histórico de estos tipos de modelos.

1. Desarrollo histórico de los modelos matemáticos epidemiológicos

Uno de los primeros modelos matemáticos fue el desarrollado por Daniel Bernoulli, en 1760, para determinar las variaciones de la enfermedad de la viruela en la población. A principios del siglo XX, Hammer determinó el principio de acción de masas para las epidemias, según estudios relacionados con el comportamiento del sarampión. Esta ley de acción de masas consiste en que la cantidad de contactos infecciosos por unidad de tiempo es proporcional al número total de contactos entre personas infectadas [7]. Ross, en 1921, diseñó el modelo de la malaria utilizando ecuaciones diferenciales. Por otra parte, Alfred Lotka y Vito Volterra (1925) utilizaron la dinámica poblacional (presa-depredador) para generar modelos epidemiológicos. Para 1927, Kermack y McKendrick generaron el modelo SIR y, de este modo, definieron las generalidades como las tasas variables y de recuperación y denominaron tres tipos de poblaciones (como los susceptibles, los infectados y los recuperados). Cabe resaltar que el resultado más relevante de este trabajo es el teorema del umbral [8], el cual consiste en que la inducción de un caso altamente infeccioso en determinada comunidad susceptible puede generar o no un brote epidemiológico si la densidad de susceptibles es menor al valor crítico. La tabla 1 resume las variables y las ventajas de los modelos epidemiológicos.

Tabla 1. Tipos de modelos epidemiológicos

Modelo	Autor	Descripción
Recurrencias de epidemias	Hammer	Tasa de contactos de los individuos, postulación de la ley de acción de masas
Modelo de Ross	Ross	Se toman dos poblaciones de mosquitos y personas para describir la enfermedad de la malaria
Modelo de Lokta- Volterra	Lokta- Volterra	Aplicación de modelos depredadores-presa para el comportamiento de epidemias
Modelo SIR	Kermack y McKendrick	Clasificación de la población general, postulación de la teoría del umbral
Modelo de Ross-McDonald	McDonald	Relación entre los humanos y mosquitos para describir el contagio de forma indirecta
Modelo de redes de transmisión	Watts y Strogats	Estudia la dinámica de contagio

Fuente: elaboración propia.

Dentro de las herramientas utilizadas en la dinámica de sistemas para predecir las epidemias, por lo general, se tienen en cuenta diferentes individuos de una población, por ejemplo: las personas que pueden ser susceptibles, los infectados y las personas recuperadas, que toma variables del modelo SIR [9], nombrado anteriormente. El objeto del estudio fue simular el comportamiento de la epidemia del SARS-CoV-2 o COVID-19, por medio de la herramienta de la dinámica de sistemas. A continuación, se define en que consiste la dinámica de sistemas y sus elementos básicos:

Dinámica de sistemas: se define como el conjunto de procedimientos necesarios para determinar el comportamiento de los sistemas en ambientes complejos [10].

Diagrama causal: es una herramienta que permite definir la relación existente, de forma positiva o negativa, que intervienen en un sistema [11].

Diagrama de Forrester: creado por el ingeniero Jay Forrester, permite la traducción de los elementos de los diagramas causales, y con ese facilita la simulación continua en programas de simulación como Vensim [12].

Vensim: es un software que tiene como objetivos documentar, analizar y simular modelos de dinámica de sistemas [11].

Variables de nivel: son aquellas variables que permiten la acumulación de un flujo [12], [13].

Variables de flujo: son aquellas variables que permiten las variaciones de las variables de nivel [12].

2. Materiales y métodos

Para el desarrollo del modelo se tuvo en cuenta en el modelo propuesto por Aracil [10], en el libro Dinámica de sistemas, y el modelo SIR. La hipótesis dinámica se define así: “El aumento de los niveles de contagios se debe al incremento de la probabilidad de contacto de las personas sanas con personas enfermas y esto se debe a la interacción de social las personas”. El diagrama causal para el modelo propuesto lo define la figura 4.

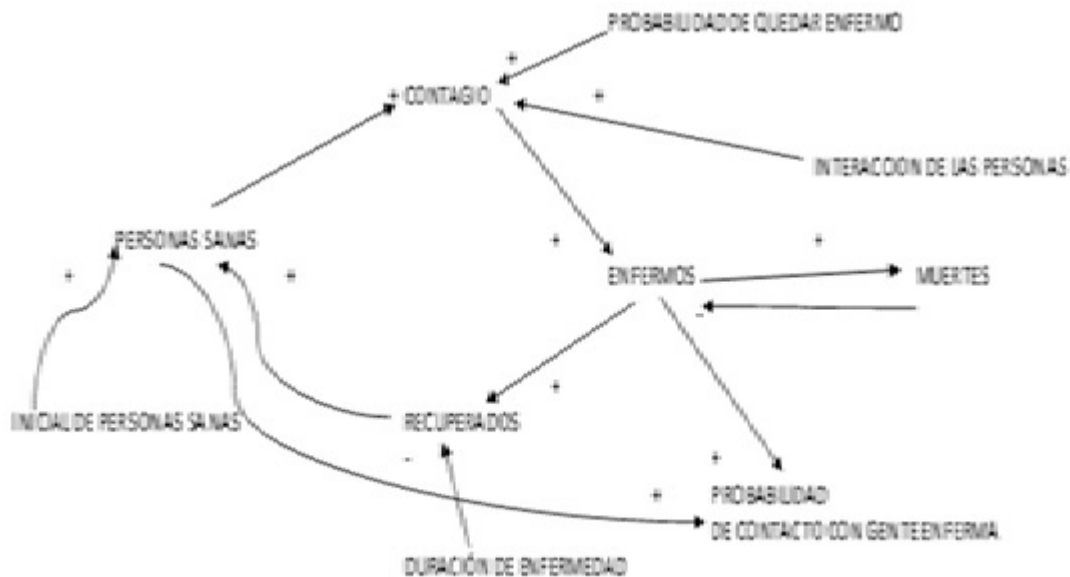


Figura 4. Diagrama causal del modelo propuesto
Fuente: Elaboración Propia

Para las variables del modelo se tuvo en cuenta el modelo SIR [10]: susceptibles (cantidad de personas sanas), infectados (cantidad de personas enfermas), recuperados. A este modelo propuesto se le adicionó una nueva variable: cantidad de personas muertas. En el desarrollo del modelo se asumieron las estadísticas publicadas por la Secretaría de Salud de Bogotá desde el primer caso reportado hasta el 10 de marzo de 2021. Las siguientes son las variables y ecuaciones que se alimentaron al software Vensim:

- Variables de estado: cantidad de personas enfermas y sanas.
- Flujos de entrada: flujo de contagio para variable de estado de las personas enfermas y flujo de personas recuperadas para cantidad de personas sanas.
- Flujos de salida: flujo de muertes que salen de la variable de estado de las personas enfermas y la salida de la variable de estado de las personas sanas es el flujo de contagio.
- Variables auxiliares: inicial de personas sanas, interacción de las personas, probabilidad de contacto con gente enferma, inicial de personas enfermas, tasa de letalidad, probabilidad de quedar enfermo, duración de la enfermedad.

2.1. Ecuaciones del modelo

2.1.1. Ecuación 1

Cantidad de personas enfermas=PE(t)

Cantidad de contagios=CC(t)

Cantidad de muertes=M(t)

Cantidad de recuperados=PR(t)

$$dPE/dt=CC(t)-M(t)-PR(t) \quad (1)$$

2.1.2. Ecuación 2

Cantidad de personas sanas=PS(t)

Población inicial =PI

$$dPS/dt=PI+PR(t)-CC(t) \quad (2)$$

2.1.3. Ecuación 3

duración de la enfermedad=DE

$$(dPR(t))/dt=(PE(t)*DE)-M(t) \quad (3)$$

2.1.4. Ecuación 4

Interacción de las personas=IP

Probabilidad de contacto con gente enferma=PCE(t)

Probabilidad de quedar enfermo= PQE

$$(dCC(t))/(d(t))=IP*PS(t)*PCE(t)*PQE \quad (4)$$

2.1.5. Ecuación 5

$$(dPCE(t))/dt = (PE(t))/(PE(t)+PS(t)) \quad (5)$$

2.1.6. Ecuación 6

Tasa de Letalidad=TL

$$dM(t)/dt = PE(t)*TL \quad (6)$$

2.2. Parámetros del modelo propuesto

- Inicial de personas sanas = 7 millones de personas, que es la población actual de Bogotá.
- Inicial de personas enfermas = 10 personas se asumen como casos importados.
- Duración de la enfermedad = 1 mes. En promedio, la enfermedad dura en incubarse de 1 a 14 días. Se asume un mes con el desarrollo de síntomas.
- Interacción de las personas = 6 personas. Para el desarrollo del modelo se asumió que una persona puede tener relación al día con 6 personas.
- Tasa de letalidad = 2,21%.
- Probabilidad de quedar enfermo = 0,30. Esta probabilidad puede modificarse de acuerdo con las políticas de cuarentena y distanciamiento social.

La figura 5 representa el diagrama de Forrester del modelo propuesto en el programa Vensim. Para el desarrollo del modelo se tuvo en cuenta el modelo propuesto por Cárdenas Bohórquez et al. [14]. Aquí las diferencias de los modelos son los objetivos de población, ya que en el anterior es sobre país (Colombia) y no tuvo en cuenta la cantidad de personas muertas.

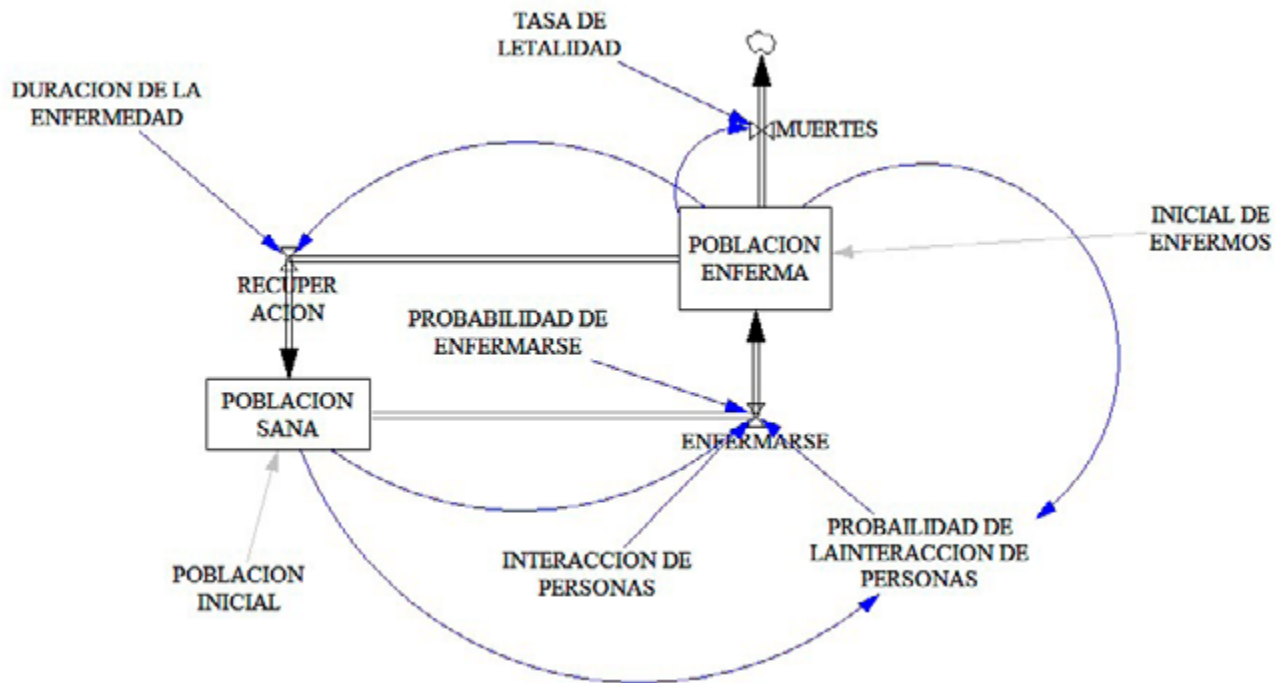


Figura 5. Diagrama de Forrester de modelo propuesto
Fuente: Elaboración propia

3. Resultados

Según los resultados arrojados por la simulación realizada en el software Vensim, se determinó que el nivel máximo de contagios es 3.405.000 y que el pico de la enfermedad se alcanzaría en el mes 15 (junio de 2022). Al año de cumplir la pandemia se alcanzaría un nivel de contagios de 993.421. Es importante nombrar que el comportamiento de la enfermedad se presenta de forma oscilante, lo cual es un comportamiento parecido al propuesto por Aracil [10], en el modelo de dinámica de sistemas para epidemias (figura 6).

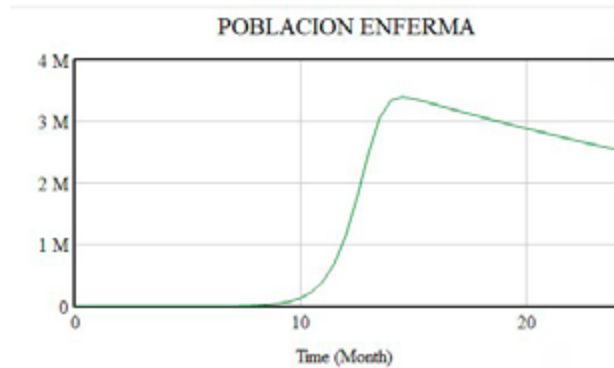


Figura 6. Simulación de la cantidad de personas enfermas en un periodo de 24 meses.
Fuente: elaboración propia a partir de los resultados de Vensim.

Para la cantidad de muertes, la tasa de letalidad utilizada es del 2,35%. Entonces, la mayor cantidad de personas muertas se alcanzaría en el mes 14, con un total 102.556 personas, y en el año de la pandemia en la ciudad se obtuvo un valor de 33.893 muertes. En este modelo no se tuvo en cuenta la capacidad de las UCI que tiene la red hospitalaria de la ciudad, lo cual puede influir en la cantidad de personas muertas (figura 7).

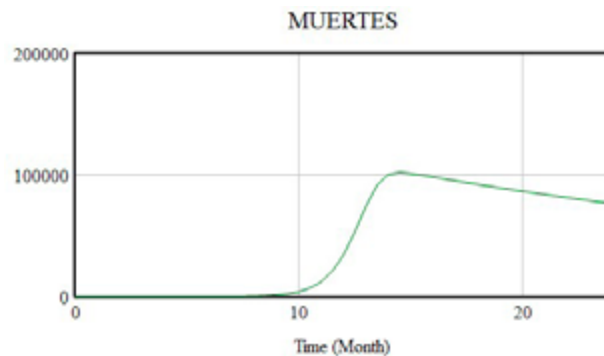


Figura 7. Simulación de la cantidad de personas muertas en un periodo de 24 meses.
Fuente: elaboración propia a partir de los resultados de Vensim.

Dentro de la simulación realizada, la cantidad de recuperados tiene un comportamiento parecido a los enfermos. Cabe anotar que el comportamiento de las personas enfermas y el de las recuperadas es igual, pero existe un retraso que se debe al tiempo promedio que dura la enfermedad (figura 8).

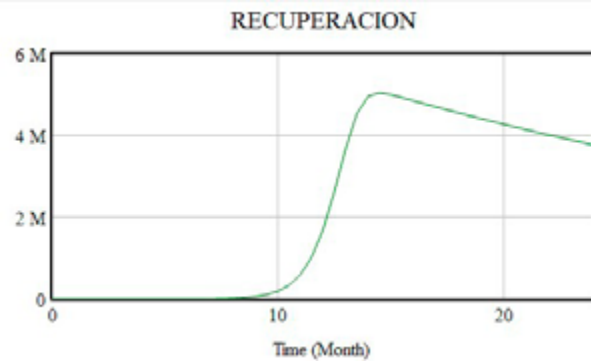


Figura 8. Simulación de la cantidad de personas recuperadas en un periodo de 24 meses. Fuente: elaboración propia a partir de los resultados de Vensim.

Para el análisis de sensibilidad del modelo se plantearon dos escenarios, y en el primero se aumentó la probabilidad de enfermarse a 0,6 (figura 9).

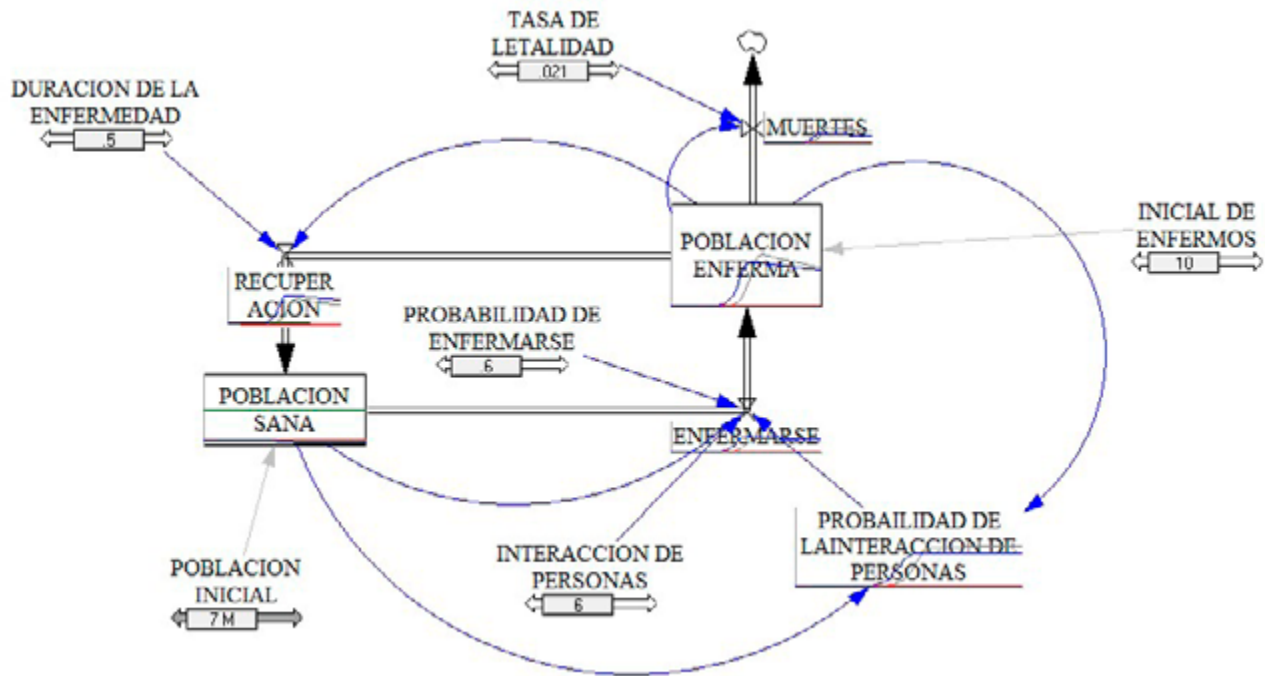


Figura 9. Análisis de sensibilidad del escenario 1 en Vensim. Fuente: elaboración propia.

El resultado de la simulación en Vensim presenta una aceleración de los índices de contagio desde el mes 8 y se alcanza una cantidad de contagios de 2.9148.000. Al año de la pandemia, los contagios alcanzan los 2.783.770 (figura 10).

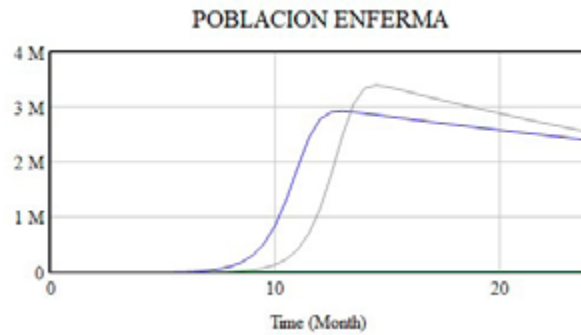


Figura 10. Cantidad de personas enfermas en escenario 1. Fuente: elaboración propia a partir de los resultados de Vensim.

Con respecto a la cantidad de personas muertas debido al virus, el nivel más alto es de 61.175 en la ciudad de Bogotá. Si se compara con el valor del modelo actual, el cual fue de 33.809 personas, se tendría un aumento bastante significativo de personas muertas, lo cual implica que un aumento en la probabilidad de enfermarse puede tener un impacto fuerte en las cifras de mortalidad y contagio (figura 11).

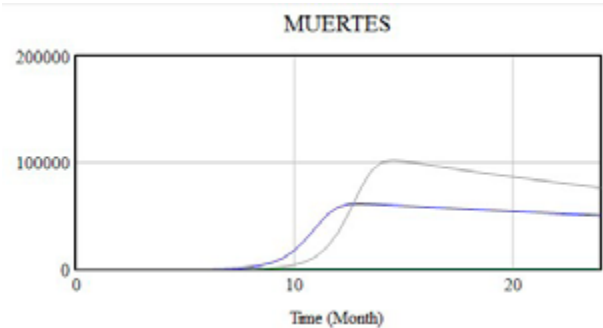


Figura 11. Cantidad de personas que fallecen en el escenario 1. Fuente: elaboración propia a partir de los resultados de Vensim.

En el segundo escenario se procedió a aumentar a 15 la interacción de las personas. La figura 12 muestra el comportamiento de las personas enfermas y se determina que la cantidad de personas enfermas alcanzaría su pico máximo en el mes 9, con un total de 3.801.456 personas y que el incremento exponencial se presentaría en el mes 6.

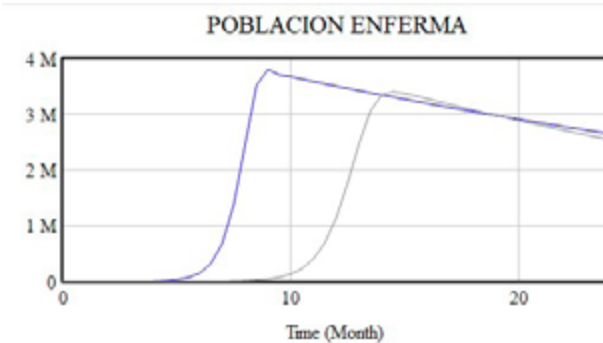


Figura 12. Cantidad de personas enfermas en el escenario 2. Fuente: elaboración propia a partir de los resultados de Vensim.

Según los resultados de la simulación, se presentarían 79.830 muertes en el mes 8, siendo el pico más alto del comportamiento simulado de la enfermedad (figura 13).

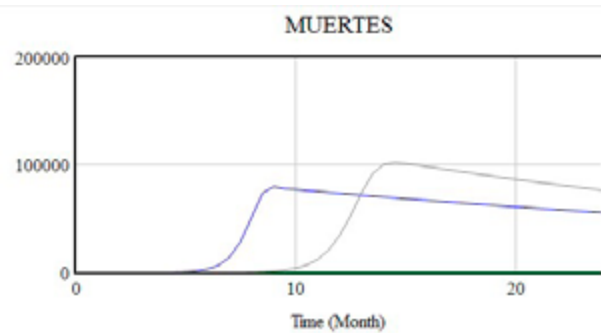


Figura 13. Cantidad de personas que fallecen en el escenario 2. Fuente: elaboración propia a partir de los resultados de Vensim.

4. Discusión

Para mejorar el desarrollo del modelo, es importante tener en cuenta otras variables, como la capacidad de las UCI, la velocidad de propagación de la enfermedad, la cantidad de pruebas realizadas y definir de forma más dinámica la probabilidad de contagio y la relación de las personas, ya que el modelo no considera que durante el periodo de estudio puedan existir estrategias por parte de la Administración Distrital para disminuir estas tasas de contagio, como los confinamientos por sectores geográficos o los confinamientos generales estrictos. En la tabla 2 se comparan los datos arrojados por la simulación con las estadísticas ofrecidas (10 de marzo de 2021) por la Secretaría de Salud del Distrito [6].

Tabla 2. Comparación de datos de simulación vs. estadísticas al 10 de marzo de 2021

	Contagios	Personas muertas	Personas recuperadas
Datos estadísticos al 10 de marzo de 2021	665.000	13.484	640.000
Datos del modelo actual	993.424	33.893	980.500
Datos el en escenario 1	2.783.870	58.450	2.520.000

Fuente: elaboración propia a partir de los resultados de Vensim.

5. Validación de la hipótesis dinámica

Con respecto a la hipótesis dinámica: “El aumento de los contagios se debe al incremento de la probabilidad de enfermarse y esto se debe a la interacción de social las personas” y según los datos arrojados en Vensim por el modelo y los escenarios propuestos, se valida la hipótesis dinámica 1, donde la causa de mayor número de contagios se debe al aumento en la interacción social de las personas.

Conclusiones

Dentro de las aplicaciones de la ingeniería industrial y con un alto potencial para usarla en el área de la salud está la dinámica de sistemas, y esta puede ser aplicada al área epidemiológica, no solo para el desarrollo del virus de la COVID-19, sino también en epidemias como dengue, zika, gripe estacional y H1N1, que han influido fuertemente, en términos de capacidad, en la población colombiana y en el sector hospitalario.

El modelo propuesto tendría la capacidad de aplicarse a enfermedades que sigan el modelo SIR, por ejemplo, enfermedades como gripe estacional, sarampión y varicela, que presentan la categorización de la población en personas susceptibles, enfermos y recuperados.

Para el sector médico, en especial la epidemiología, la utilización de herramientas de ingeniería industrial, como la dinámica de sistemas o la analítica de datos, puede ayudar a mejorar sus procesos de planeación y predictividad de la evolución de epidemias y, con ello, determinar qué cantidad y tipos de recursos requieren para disminuir el impacto de las enfermedades infecciosas y virus.

Mejorar la predictibilidad del modelo requiere variables como el proceso de mutación del virus COVID-19 y la inmunidad que pueda tener la población; además, el comportamiento dinámico de la sociedad con respecto al riesgo de contraer el virus, el cual puede ser cambiante durante el transcurso del tiempo, ya que en un principio las personas tenderán a respetar las medidas de confinamiento; pero con el paso de los días esto podría cambiar. En el modelo propuesto, ello se presenta de forma constante, por medio de la probabilidad de contraer la enfermedad y la interacción de las personas.

Así mismo, con el modelo propuesto se valida que el aumento en la probabilidad de enfermarse se debe a la interacción social de las personas y ello lleva al incremento de casos de contagio, lo cual valida las estrategias de aislamiento y autocuidado propuestas por los diferentes entes territoriales.

Los resultados del modelo simulado en Vensim al año de aparecer la pandemia tiene una diferencia de 328.424 contagios más en la ciudad de Bogotá D.C. de los presentados por Salud Data, lo cual implica una diferencia del 33%. Cabe resaltar que este virus presenta casos asintomáticos y la capacidad de pruebas, lo cual dificulta comparar y validar los datos reales versus los datos arrojados por la simulación.

Con respecto a los escenarios propuestos, donde, en primera medida, se aumenta la probabilidad de 0,3 a 0,6, se presenta un nivel de fallecimientos menor; pero hay un crecimiento más rápido en los casos de muertes que utilizando los datos originales del modelo de simulación propuesto.

Dentro de las mejoras que podría presentar el modelo a futuro es tener en cuenta las situaciones de reinfecciones, debido a mutaciones del virus y la aplicación y efectividad de las vacunas, que en la actualidad se presenta en forma real.

Referencias

- [1] Organización Mundial de la Salud, “Brote de enfermedad por coronavirus (COVID-19)”. 2020. [En línea]. Disponible: <https://www.who.int/es/emergencias/diseases/novel-coronavirus-2019>
- [2] Statista, “Evolución del número acumulado de casos de coronavirus en el mundo desde el 22 de enero de 2020 hasta el 20 de abril de 2021”, 2020. [En línea]. Disponible: <https://es.statista.com/estadisticas/1104227/numero-acumulado-de-casos-de-coronavirus-covid-19-en-el-mundo-enero-junio/>
- [3] Asociación Colombiana de Infectología, “Consenso colombiano de atención, diagnóstico y manejo de la infección por SARS-Cov 2 en establecimientos de atención de la salud”, Infectio, vol. 24, n.º 3, 2020. <http://dx.doi.org/10.22354/in.v24i3.851>
- [4] M. Perfetti del Corral y S. M. Gómez Mesa, “Un análisis demográfico de la COVID-19: ¿quiénes son los más vulnerables. Razón Pública, 11 de mayo de 2020. [En línea]. Disponible: <https://razonpublica.com/analisis-demografico-la-covid-19-quienes-los-mas-vulnerables/>.
- [5] Ministerio de Salud y Protección Social de Colombia, “Colombia confirma su primer caso de COVID-19”, 6 DE MARZO DE 2020. [En línea]. Disponible: <https://www.minsalud.gov.co/Paginas/Colombia-confirma-su-primer-caso-de-COVID-19.aspx>
- [6] Secretaría de Salud Distrital, “Datos de salud: enfermedades transmisibles”. [En línea]. Disponible: <http://saludata.saludcapital.gov.co/osb/index.php/datos-de-salud/enfermedades-Matrasmisibles/covid19/>
- [7] E. C. Pliego Pliego, “Modelos epidemiológicos de enfermedades virales infecciosas”, tesis de pregrado, Universidad Autónoma de Puebla, México, 2011. [En línea]. Disponible: <https://www.fcfm.buap.mx/assets/docs/docencia/tesis/matematicas/EmileneCarmelitaPliegoPliego.pdf>
- [8] D. Hincapié Palacio y J. F. Ospina Giraldo, “Aplicación del teorema del umbral estocástico de Whittle a un brote de varicela”, Rev. Saúde Pública, vol. 40, n.º 4, 2002. <https://doi.org/10.1590/S0034-89102006000500015>
- [9] F. Manrique-Abril, C. A. Agudelo-Calderón, V. M. González-Chordá, O. Gutiérrez-Lesmes, C. Téllez-Piñeres y G. Herrera-Amaya, “Modelo SIR de la pandemia de COVID-19 en Colombia”, Rev. Salud Pública, n.º 22, pp. 1-9, 2020. <https://doi.org/10.15446/rsap.V22.85977>
- [10] J. Aracil, Dinámica de sistemas. Madrid: Isdefe, 1997.
- [11] J. M. García, Teoría y ejercicios prácticos de dinámica de sistemas. s. l.: s. e., 2019.
- [12] F. González Becerra, Introducción a la dinámica de sistemas en la ingeniería industrial. Bogotá: Editorial Neogranadina, 2020. <https://doi.org/10.18359/9789588795843>
- [13] C. A. Castro Castro, L. A. Londoño Ciro y J. C. Valdés Quintero, “Modelación y simulación computacional usando sistemas de información geográfica con dinámica de sistemas aplicados a fenómenos epidemiológicos”, Rev. Fac. Ing., n.º 34, pp. 86-100, 2005. [En línea]. Disponible: <https://www.redalyc.org/pdf/430/43003408.pdf>
- [14] S. J. Cárdenas Bohórquez, D. M. Muñoz Morales, C. A. Reales Arrieta, A. T. Zabala Prieto y O. M. Gelves Alarcón, “Modelo de dinámica de sistemas para el progreso del SARS-Cov-2 (COVID-19) en Colombia”, Bogotá: Universidad Santo Tomás, 2020.
- [15] Botero J, “Efectos en la economía colombiana del COVID-19,” Economía Colombia Análisis de Coyuntura Universidad Eafit, Medellín, p. 21, 2020.
- [16] Castro C, “Modelación y simulación computacional usando sistemas de información geográfica con dinámica de sistemas aplicados a fenómenos epidemiológicos,” Revista Facultad de Ingeniería de Antioquia, p. 15, 2005.
- [17] Montesinos O, “Modelos matemáticos para enfermedades infecciosas,” Salud Publica de México, México D.F, p. 9, 2007.
- [18] Sterman J, Business Dynamics Systems Thinking and Modelling for a Complex World. New Age International, 2009.

- [19] Weis H, "The SIR model and the Foundations of PublicHealth "Materials Matemàtic Barcelona P 17, 2013
- [20] Malagon J," SARS-CoV-2 and RT-PCR in asymptomatic patients: Results of a cohort of workers at El Dorado International Airport in Bogotá, 2020 " Biomédica : Revista del Instituto Nacional de Salud p 166-172 ,2020
- [21] Deckert A," Simulation of pooled-sample analysis strategies for covid-19 mass testing" Bulletin of the World Health Organization p pp. 590-598 ,2020
- [22] Trastoy J,," Simultaneous hospital/primary care real time simulation during COVID-19 alert " Anales de Pediatría ,2020
- [23] Diaz D. "Will the Colombian intensive care units collapse due to the COVID 19 pandemic" Travel medicine and infectious disease ,2020
- [24] Isea R," La dinámica de transmisión del Covid 19 desde una perspectiva matemática" Revista Observador del conocimiento, p 15-23 ,2020
- [25] Díaz J," Uso de modelo predictivo para la dinámica de transmisión del COVID 19" Revista Repertorio de Medicina y cirugía, P. 34-44 2020
- [26] Ardila G," Modelos Matemáticos y el Covid 19 " Colombia Medica ,P. 1-9 2020
- [27] González C," Modelando la Covid 19 con solo una ecuación" Revista ciencia de las Matemáticas Vol 34, P. 33-36 2020
- [28] Maestre, J "Simulation as Tool to facilities the Healthcare organization adaption the Covid 19 – Pandemic" Revista Educación Medica 2020
- [29] Díaz, J "Precisión del pronóstico de la propagación del Covid 19 en Colombia" Revista Repertorio de Medicina y cirugía P 27-33 2020