

DOI: <https://doi.org/10.5554/22562087.e1079>

La utilidad de los modelos matemáticos en epidemiología para la toma de decisiones en salud pública

The value of mathematical modelling approaches in epidemiology for public health decision making

Oscar Espinosa^a , Oscar H. Franco^{b,c} , Martha Ospina^d , Mabel Carabalí^e ,
Ricardo Baeza-Yates^{f-h} 

^a Grupo de Investigación en Modelos Económicos y Métodos Cuantitativos, Centro de Investigaciones para el Desarrollo, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.

^b Departamento de Salud Pública Global, Universidad de Utrecht. Utrecht, Países Bajos.

^c Harvard T.H. Chan School of Public Health, Harvard University. Boston, Estados Unidos.

^d Florida International University. Miami, Estados Unidos.

^e Dalla Lana School of Public Health, University of Toronto. Toronto, Canadá.

^f Institute for Experiential AI, Northeastern University. California, Estados Unidos.

^g Departamento de Tecnologías de la Información y Comunicaciones, Universitat Pompeu Fabra. Barcelona, España.

^h Departamento de Ciencias de Computación, Universidad de Chile. Santiago de Chile, Chile.

Correspondencia: Universidad Nacional de Colombia, Carrera 30 N°. 45-03. Bogotá, Colombia. **Email:** oaespinosaa@unal.edu.co

Cómo citar este artículo: Espinosa O, Franco OH, Ospina M, Carabalí M, Baeza-Yates R. The value of mathematical modelling approaches in epidemiology for public health decision making. Colombian Journal of Anesthesiology. 2023;51:e1079.

Resumen

Se trata sobre la importancia de los abordajes cuantitativos, específicamente la formulación de modelos matemáticos en epidemiología, dentro del proceso de toma de decisiones en salud pública. Esta importante temática se analiza basándose en la experiencia de algunos expertos en epidemiología matemática y salud pública. En primer lugar, se presenta la definición de modelación matemática, particularmente dentro del contexto de la epidemiología. En segundo lugar, se abordan los diferentes usos y las implicaciones socio-políticas, incluyendo ejemplos de experiencias recientes que han ocurrido a nivel internacional. Finalmente, se hace referencia a ciertas consideraciones generales respecto a los retos que representa el uso y la aplicación de modelos matemáticos en epidemiología para el proceso de toma de decisiones a nivel local y nacional.

Palabras clave

Modelamiento matemático; Epidemiología; Salud pública; Toma de decisiones; Anestesiología.

Abstract

It is discussed the relevance of quantitative approaches, specifically mathematical modelling in epidemiology, in the public health decision-making process. This topic is discussed here based on the experience of various experts in mathematical epidemiology and public health. First, the definition of mathematical modelling is presented, especially in the context of epidemiology. Second, the different uses and socio-political implications, including empirical examples of recent experiences that have taken place at the international level are addressed. Finally, some general considerations regarding the challenges encountered in the use and application of mathematical modelling in epidemiology in the decision-making process at the local and national levels.

Key words

Mathematical modelling; Epidemiology; Public health; Decision making; Anesthesiology.

Read the English version of this article on the journal website www.revcolanest.com.co

Copyright © 2023 Sociedad Colombiana de Anestesiología y Reanimación (S.C.A.R.E.).

Este es un artículo de acceso abierto bajo la licencia CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

INTRODUCCIÓN

El modelamiento matemático, entendido como el uso y la aplicación de métodos cuantitativos para estudiar el comportamiento y la distribución de diferentes eventos de salud -incluyendo las enfermedades infecciosas- y los procesos de salud relacionados, permite una representación confiable de los procesos biológicos que observamos en la naturaleza. (1) En el área de salud pública y epidemiología, la formulación de modelos matemáticos agrega valor al análisis convencional, ofreciendo información estratégica sobre el diseño de mecanismos para la protección, el cuidado y la promoción de la salud en la sociedad. (1,2) En escenarios de gran incertidumbre y en un mundo altamente interconectado, el riesgo de transmisión de enfermedades infecciosas de uno a otro continente, país y/o región y entre ciudades dentro de un mismo país, es un factor de suma importancia. Además, las limitaciones presupuestarias para el manejo de las crisis en salud pública representan una presión adicional para quienes diseñan las políticas y toman las decisiones, pues se espera que ellos asignen de manera óptima los recursos disponibles en salud (Ej., exámenes de laboratorio, vacunas, etc.) para reducir la carga de enfermedad y la mortalidad a nivel local o nacional (3), especialmente cuando hay que lidiar con emergencias sanitarias durante las cuales, además de la falta de información, hay poco tiempo para tomar decisiones.

En este artículo buscamos contribuir a la reflexión sobre la utilidad de la epidemiología matemática en el contexto de los tomadores de decisiones políticas en salud pública, como herramienta de asesoría para la resolución de problemas que aquejan la calidad de vida de la población y que pueden afectar significativamente ciertos procesos demográficos subyacentes como el envejecimiento de la población. (4) Más aún, la formulación de modelos matemáticos pudiera jugar un papel crucial en la epidemiología, ofreciendo un marco efectivo para soluciones basadas en evidencia en situaciones de emergencia, incluyendo el manejo de futuras pandemias.

Epidemiología matemática, ¿una herramienta o una tendencia?

La misión implícita de la formulación de modelos matemáticos en epidemiología es capturar y replicar -lo más fidedignamente posible- los escenarios de la vida real, mediante el uso de diferentes diseños y la construcción y aplicación de procesos o sistemas. Este abordaje facilita la incorporación de la incertidumbre y de la compleja interacción entre los factores, así como el posible impacto de soluciones y decisiones sobre los procesos naturales. Este ejercicio facilita y mejora los procesos de toma de decisiones que se basan fuertemente en, y están configurados de acuerdo con, conclusiones concretas e interpretación directa de la evidencia. (5) La ventaja del abordaje matemático se basa en su lenguaje preciso y en sus reglas bien definidas, así como en el rápido y confiable desempeño de los cálculos matemáticos complejos que utilizan ingentes recursos de cómputo para generar resultados. (6) Esta es una ventaja que también puede aplicarse y utilizarse para informar al público en general y a poblaciones objetivo, no solamente acerca de problemas, sino también sobre el posible impacto de una determinada gama de soluciones y, por ende, servir de información para decisiones futuras.

Un primer paso en la construcción de modelos matemáticos, y en general de cualquier proyecto de investigación, es el diseño de una pregunta de investigación pertinente y la definición conceptual del problema en cuestión. Esto representa el objetivo clave, en donde se puede hacer la integración cualitativa de la información existente y una descripción del sistema que se va a modelar, estando sujeto a cambios según evolucionen las circunstancias. (4,7) Este proceso se complementa con la ilustración de las teorías que respaldan el problema, que luego se traduce en la descripción, la evaluación y la validación cuantitativa del proceso. Este paso se define como el proceso de formalización matemática que incluye la optimización, el cálculo de los parámetros, la evaluación crítica de la idonei-

dad, la simulación y predicción, entre otras actividades. Finalmente, los resultados de los modelos matemáticos en epidemiología pueden compararse contra la situación real, lo cual también genera una retroalimentación para hacer ajustes de manera interactiva a los supuestos y parámetros del modelo, según corresponda a las realidades actuales. (1,4,8)

Formulación de modelos matemáticos en epidemiología: ¿Un nuevo concepto?

De acuerdo con Brauer y Castillo-Chavez (9), aparentemente existe una asociación positiva entre la madurez de un campo científico y la frecuencia con la cual se desarrollan, aplican y analizan modelos matemáticos para comprender sus sistemas, de acuerdo con la evidencia del mundo real.

Los modelos matemáticos en epidemiología se originaron a raíz del trabajo de Daniel Bernoulli durante la segunda mitad del siglo XVIII, cuando él analizó los beneficios de la inoculación contra la viruela desde un abordaje actuarial. Desde entonces se han desarrollado modelos cada vez más complejos que incluyen múltiples factores e interrelaciones específicas que ocurren en los sistemas biológicos. Entre los modelos más significativos, encontramos los que se asocian a la edad de la infección, las enfermedades transmitidas por vectores, modelos de transmisión del VIH/SIDA, heterogeneidad de mixtura -que toma en consideración los súper-propagadores-, el sistema estadístico-espacial, la inmunidad cruzada y la co-infección, y la resistencia farmacológica, entre otros factores de interés. (1,2,4)

Estos modelos cuantitativos como herramienta para planificar y diseñar los programas de control de enfermedades infecciosas emergentes y persistentes, permiten usar supuestos explícitos, probar diferentes tipos de hipótesis, identificar patrones de propagación de epidemias, considerar los parámetros de costos (Ej., costo-efectividad, costo-beneficio, costo-utilidad, etc.), cuantificar posibles desenlaces adversos y

estimar el posible impacto de algunas medidas. A través del tiempo, los encargados de diseñar las políticas y los tomadores de decisiones en salud pública han dado cada vez mayor importancia al aporte que representan los modelos matemáticos. Éstos se utilizan principalmente como una herramienta teórica-práctica en el análisis de las enfermedades transmisibles, para abordar los problemas de la prevención, diagnóstico, tratamiento y control de la propagación.

Uno de los aspectos trascendentales que pudiera impactar el uso de los modelos matemáticos como herramienta es la comunicación clara y oportuna. La comunicación bidireccional entre el equipo que diseña los modelos y quienes diseñan las políticas es esencial; ello implica una comunicación clara y pedagógica de todos los aspectos relacionados con el propósito, el alcance, la selección del modelo, los supuestos, el desarrollo y la interpretación de los sistemas matemáticos. En otras palabras, todo lo que tiene que ver con la integridad y el manejo de los modelos. En este sentido, las guías internacionales de práctica actuarial (10) son una referencia valiosa que ofrece principios claros y sistemáticos para una mayor transparencia y asertividad en las diferentes etapas del proceso de transferencia del conocimiento, cuando se comunican los resultados de los ejercicios de modelamiento matemático.

Abordajes contemporáneos de la epidemiología matemática: ¿Consolidación para la acción?

El siglo XXI ha sido testigo del surgimiento de una gran cantidad de escenarios en donde los expertos en formulación de modelos matemáticos han pasado a jugar un papel preponderante como asesores en la gestión de epidemias y pandemias. Un ejemplo bien conocido fue lo ocurrido en los Estados Unidos luego del brote de la influenza A (H1N1) pdm09, cuando la Organización Mundial de la Salud (OMS) convocó a una red informal de modeladores matemáticos y expertos en salud pública, con miras a evaluar la dinámica del virus y la efectividad de las diferentes intervenciones. (11) Además, en 2016 la OMS organizó un evento con la participación de distintas univer-

sidades de todo el mundo, para abordar el tema de cómo incorporar efectivamente los resultados de la formulación de modelos matemáticos a las guías, como organismo internacional especializado, resaltando que la formulación de modelos "(...) pudiera tener una mayor aceptación e influir más en situaciones en las que se requiere una acción inmediata, pero donde existe muy poca evidencia empírica disponible y sería seguramente más aceptable en salud pública que en la toma de decisiones clínicas". (12)

Durante la reciente pandemia de COVID-19, muchas instituciones internacionales han desarrollado diferentes modelos matemáticos. Se han utilizado diferentes enfoques para analizar, por ejemplo, la magnitud de la propagación del SARS-Cov-2, cuál sería la tasa de infección ante las distintas intervenciones no farmacéuticas implementadas por el gobierno (Ej., aislamiento de casos sospechosos y confinamiento), y la evaluación de su efectividad. Otras iniciativas han analizado la gestión de la demanda de recursos de salud, la optimización de los suministros restringidos de vacunas y medicamentos para pacientes críticamente enfermos (Ej., unidades de cuidados intensivos), la escasez de recursos humanos clínicos y el impacto socio-económico de los confinamientos, entre otros temas de interés.

Sin embargo, la COVID-19 representó nuevos desafíos para la formulación de modelos matemáticos. Dada la naturaleza cambiante de la evidencia sobre los múltiples factores requeridos para el desarrollo de un modelo (Ej., período de incubación, limitaciones de la sensibilidad y especificidad de las pruebas, limitaciones para el acceso y entrega oportuna de los resultados de las pruebas PCR, y el gran porcentaje de casos asintomáticos), los científicos tuvieron que lidiar con datos incompletos y con frecuencia imprecisos.

Esta situación exigió recurrir a la innovación y llevó al uso de datos potencialmente más actualizados, a pesar de que no siempre eran precisos, como serían los niveles de ocupación de camas, la movilidad de las personas, consultas a través de motores de búsqueda, informaciones a través de las redes sociales como Twitter y Facebook, entre otras, que permitieron pronósticos de mejor calidad y más oportunos. (13)

En esta área, se destacan los estudios técnicos llevados a cabo por el Imperial College COVID-19 Response Team (Inglaterra), la Universidad de Washington y los Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades (Estados Unidos). Sin embargo, también es importante reconocer que además de estas iniciativas en países de altos ingresos, hubo un uso emergente de estas tecnologías entre los países de bajos y medianos ingresos (PBMIs). En mayor medida, los PBMIs empezaron a utilizar los modelos matemáticos como un recurso de investigación teórico-práctico, principalmente para fines educativos. Sin embargo, su uso como herramienta se observó en universidades, centros de investigación, agencias de tecnologías sanitarias o institutos nacionales de salud que trabajaron de manera independiente o como parte de equipos de colaboración para contribuir al conocimiento de diferentes escenarios, decisiones y soluciones durante la pandemia.

Epidemiología matemática durante la pandemia, ¿Una nueva generación?

La urgencia de esta reciente situación durante la pandemia y la creciente necesidad de encontrar soluciones despertó un mayor interés por las ciencias en general, y por la epidemiología en particular. Por lo tanto, ahora existe un extenso desarrollo científico con amplia divulgación de la información disponible y una importante capacitación del capital humano en la formulación de modelos matemáticos. Otros factores también han contribuido durante la pandemia: la interconectividad digital de las redes de investigación, la revolución de los datos y de las fuentes abiertas, la mayor capacidad de procesamiento de computación, así como la mejora parcial de la información epidemiológica y de los sistemas de vigilancia. Sin embargo, a pesar de que todos estos aspectos son útiles, se han visto desafiados por la complejidad de los escenarios, las restricciones presupuestarias sobre la inversión en las ciencias, la tecnología y la innovación, además de la incertidumbre de los escenarios políticos y la avalancha de desinformación, entre otros factores.

La atención y la divulgación en los medios (Ej., la televisión y las redes sociales)

sobre el uso de modelos matemáticos para la toma de decisiones en salud pública también ha despertado un mayor interés y la aceptación del uso de modelos matemáticos como un insumo clave en la formulación de políticas públicas. De manera similar a otras situaciones tales como el sufragio o las campañas electorales, la información que se divulga a través de los medios tiene un impacto sobre la población y sobre los líderes responsables; dependiendo del contexto y del nivel tecnocrático, ellos pueden darse cuenta del alcance potencial de la información sobre la masa de electores y pudieran o no considerar el uso de la información para tomar decisiones sobre acciones a futuro en sus procesos. (14) No obstante, no todos los aportes o resultados de los ejercicios de formulación de modelos matemáticos son atendidos, comprendidos o aplicados de manera oportuna o de un todo por quienes toman las decisiones. Algunas experiencias de los Estados Unidos y de Brasil muestran que aun con equipos de investigación técnicamente robustos, algunas de las medidas de control adoptadas en el 2020 para la pandemia de COVID-19, no siempre fueron coherentes con las recomendaciones epidemiológicas. (15,16) En estos ejemplos, la coordinación global y regional a nivel político fue mínima y no contribuyó al control de la pandemia en ese momento, lo cual desafió la generación y el uso de los recursos epidemiológicos para la toma de decisiones. (16)

Por otra parte, una historia relativamente exitosa se observó en Colombia, donde desde mediados de marzo de 2020, bajo el liderazgo del Instituto Nacional de Salud, se organizó un grupo denominado “Modelamiento COVID-19 Colombia” con la participación de diferentes personas en cargos gerenciales de entidades técnicas del sector salud y del gobierno (Ej. Instituto de Evaluación Tecnológica en Salud, Departamento Administrativo Nacional de Estadística, Departamento Nacional de Planeación, además de algunas universidades nacionales e internacionales, entre otras instituciones). Este grupo técnico-científico diseñó modelos matemáticos que brindaron información al Ministerio de Salud y Protección Social para la toma de decisiones en

tiempo real. (17) Adicionalmente, se llevó a cabo un análisis de costo-beneficio para identificar el portafolio óptimo de vacunas contra la COVID-19 que debía comprar el país (18) y un análisis de costo-efectividad del Plan Nacional de Vacunación contra la COVID-19, lo que permitió obtener una visión integral del manejo de riesgos para la priorización de la vacunación. (19) Por otra parte, en una acción sin precedentes para aunar esfuerzos en la historia del sector salud en el país, fue posible combinar diferentes bases de datos para diseñar un visor geográfico interactivo contra la COVID-19 (a nivel de bloques), en tiempo récord y con una infraestructura tecnológica de alto nivel, técnicas avanzadas de big data y ciencias de datos de vanguardia. (20) Esta herramienta de cómputo ayudó, entre otras cosas, a la toma de decisiones informada para la asignación de transferencias monetarias a la población más vulnerable del país, afectada por la pandemia, utilizando la evidencia del mundo real.

La capacitación, las percepciones, las aptitudes, los valores y las creencias de los tomadores de decisiones en los altos niveles de gobierno, tanto local como nacional, son factores determinantes para la adecuada adopción e implementación de medidas basadas en los resultados de la formulación de modelos matemáticos. Existen otras limitaciones debido a la incapacidad para aplicar ciertas reglas o supuestos dentro del contexto local específico, o debido a la jurisprudencia regional. Para garantizar que el trabajo entre tomadores de decisiones y modeladores adopte el curso de acción más apropiado y genere el máximo de beneficio, estos esfuerzos siempre deberán basarse en una relación de confianza mutua, preferiblemente de largo plazo y no solo temporal, para partir de un lenguaje adaptativo (Ej., representaciones gráficas bajo principios de visualización estadística claros, concisos y de alto impacto), una transferencia pertinente del conocimiento incluyendo la presentación de informes formales (traducidos en costo-efectividad / costo-beneficio / costo-utilidad) y una adecuada evaluación de la calidad de la evidencia de los modelos analíticos desarrollados. (3,15,21,22)

CONCLUSIONES

En resumen, algunos de los desafíos que deberá seguir abordando la formulación de modelos de epidemiología matemática para la toma de decisiones en salud pública son: i) el mejoramiento continuo de la comunicación asertiva y efectiva hacia los tomadores de decisiones y la población en general, con miras a una mayor comprensión entre las partes (es decir, fortaleciendo las relaciones de confianza ente los equipos científicos y políticos); ii) un financiamiento importante para el desarrollo de estudios de cohortes, estudios sistemáticos de vigilancia sindrómica y estudios serológicos que puedan determinar, dentro del contexto local de cada país (con su diversidad regional explícita), la verdadera situación de la enfermedad estudiada; iii) un enfoque interdisciplinario con un marco de referencia cuantitativo que finalmente se traduzca en posibles soluciones; comprender, no solamente el componente biológico, sino también los factores sociales complejos presentes en la mayoría de los territorios alrededor del mundo, a través de una perspectiva cada vez más integral; y iv) en escenarios en donde la formulación de modelos incorpore datos clínicos además de evidencia del mundo real, es necesario tomar en consideración el sub-reporte y entender la complejidad de esta información, conociendo su historia y significado para quienes recaban estos datos (epidemiólogos de campo, clínicos expertos, entre otros).

Es probable que en el futuro surjan nuevas pandemias y desafíos para la salud y el bienestar de la población. El cambio climático, los problemas del medio ambiente, las enfermedades no transmisibles entre las poblaciones de adultos mayores con estilos de vida inadecuados y la aparición y re-aparición de enfermedades infecciosas cuya propagación se ve favorecida por la globalización, son amenazas inminentes e importantes que requieren decisiones y políticas críticas que deberán basarse en la mejor evidencia disponible y en la ciencia. En este sentido, la formulación de modelos matemáticos pudiera servir para esquematizar

escenarios y brindar soluciones, así como para proporcionar un marco de referencia para el uso y la interpretación de los datos en constante crecimiento dentro del área de la salud. Las soluciones efectivas para las necesidades globales, requieren abordajes regidos por la información y basados en evidencia.

RECONOCIMIENTOS

Contribuciones de los autores

Todos los autores colaboraron por igual en la concepción, la redacción y la revisión del documento.

Apoyo financiero y patrocinio

Ninguno declarado.

Conflictos de interés

Ninguno declarado.

REFERENCIAS

- Brauer F. Mathematical epidemiology: past, present, and future. *Infect Dis Model.* 2017;2(2):113-27. doi: <https://doi.org/10.1016/j.idm.2017.02.001>
- Mondaini R, Pardalos P, editors. *Mathematical modelling of biosystems.* Berlin: Springer; 2008. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-540-76784-8>
- Star L, Moghadas SM. The role of mathematical modelling in public health planning and decision making. *Purple Pap.* 2010;(22):1-6.
- Hadeler P. *Topics in mathematical biology.* Tübingen: Springer; 2017. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-65621-2>
- Domotor Z. Philosophy of science, mathematical models in BT - Mathematics of complexity and dynamical systems. In: Meyers R, editor. *New York: Springer; 2011. p. 1407-22.* doi: https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1806-1_89
- Hosking R, Venturino E, editors. *Aspects of mathematical modelling.* Boston: Springer; 2008. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8591-0>
- Mesterton-Gibbons M. *A concrete approach to mathematical modelling.* New York: John Wiley & Sons, Inc.; 2007. doi: <https://doi.org/10.1002/9781118032480>
- Torres N, Santos G. The (mathematical) modeling process in biosciences. *Front Genet.* 2015;6:354. doi: <https://doi.org/10.3389/fgene.2015.00354>
- Brauer F, Castillo-Chávez C. *Mathematical models in population biology and epidemiology.* New York: Springer; 2010. doi: https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1686-9_9
- International Actuarial Association. *International Standard of Actuarial Practice (ISAP 1A) - Governance of models.* Ottawa: International Actuarial Association; 2016. [Internet]. [Citado 16 Mar 23]. Disponible en: http://www.actuaries.org/CTTEES_ASC/isaps/Final_ISAPs_posted/ISAP_1A_Final_November2016_Web.pdf
- Van Kerkhove M, Ferguson N. Epidemic and intervention modelling - a scientific rationale for policy decisions? Lessons from the 2009 influenza pandemic. *Bull World Health Organ.* 2012;90(4):306-10. doi: <https://doi.org/10.2471/BLT.11.097949>
- World Health Organization. *Consultation on the development of guidance on how to incorporate the results of modelling into WHO guidelines.* Geneva; 2016. [Internet]. [Citado 16 Mar 23]. Disponible en: <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/258987/WHO-HIS-IER-REK-2017.2-eng.pdf?sequence=1&i-sAllowed=y>
- Kogan N, Clemente L, Liautaud P, Kaashoek J, Link N, Nguyen A, et al. An early warning approach to monitor covid-19 activity with multiple digital traces in near real time. *Sci Adv.* 2021;7(10):eabd6989. doi: <https://doi.org/10.1126/sciadv.abd6989>
- van de Goor I, Hämäläinen R, Syed A, Juel Lau C, Sandu P, Spitters H, et al. Determinants of evidence use in public health policy making: results from a study across six EU countries. *Health Policy.* 2017;121(3):273-81. doi: <https://doi.org/10.1016/j.healthpol.2017.01.003>
- The COVID-19 Multi-Model Comparison Collaboration (CMCC) Policy Group. *Guidance on use of modelling for policy responses to covid-19.* 2020. [Internet]. [Citado 16 Mar 23]. Disponible en: <https://decidehealth.world/en/news/guidance-use-modelling-policy-responses-covid-19>
- Harari YN. *Lessons from a year of Covid.* Financial Times. 2021. [Internet]. [Citado 16 Mar 23]. Disponible en: <https://www.ft.com/content/f1b30f2c-84aa-4595-84f2-7816796d6841>
- Instituto Nacional de Salud. *Modelos COVID-19.* 2023. [Internet]. [Citado 16 Mar 23]. Disponible en: <https://www.ins.gov.co/Direcciones/ONS/modelos-covid-19>
- Espinosa O, Rodríguez J, Robayo A, Arregocés L, Agudelo N, Suárez C, et al. *Advance Market Commitments (AMC) model application for Colombian purchase strategy of COVID-19 vaccines.* *Vaccine X.* 2022;12:100197. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jvacx.2022.100197>
- Morales-Zamora G, Espinosa O, Puertas E, Fernández J, Hernández J, Zakzuk V, et al. *Cost-effectiveness analysis of strategies of COVID-19 vaccination in Colombia: comparison of high-risk prioritization and no prioritization strategies with the absence of a vaccination plan.* *Value Heal Reg Issues.* 2022;31:101-10. doi: <https://doi.org/10.1016/j.vhri.2022.04.004>
- Espinosa O, Rodríguez J, Robayo A, Arias L, Moreno S, Ospina M, et al. *Vulnerability interactive geographic viewer against COVID-19 at the block level in Colombia: Analytical tool based on machine learning techniques.* *Reg Sci Policy Pract.* 2021;13(S1):187-97. doi: <https://doi.org/10.1111/rsp3.12469>
- Metcalf C, Edmunds W, Lessler J. *Six challenges in modelling for public health policy.* *Epidemics.* 2015;10:93-6. doi: <https://doi.org/10.1016/j.epidem.2014.08.008>
- Kretzschmar M. *Disease modeling for public health: added value, challenges, and institutional constraints.* *J Public Health Policy.* 2020;41(1):39-51. doi: <https://doi.org/10.1057/s41271-019-00206-0>