

Impacto del uso de medidas de protección en la propagación de virus: Una simulación con autómatas celulares y una arquitectura de dispositivos unificados de computación, ADUC

Impact of the use of protective measures on the spread of viruses: A simulation with cellular automata and a compute unified device architecture, CUDA

Alejandro Jared Soto-Cass¹, Ivonne Domínguez-Román²,
Michel Joseph Julien-Lombard^{1*}

¹Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química, Departamento de Matemáticas

²Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química, Departamento de Física y Química Teórica

Correo-e (e-mail)*: julien.lombard@quimica.unam.mx

*Autor a quien debe dirigirse la correspondencia / *Corresponding author*

Recibido / *Received*: Agosto / *August* 15, 2025

Aceptado / *Accepted*: Septiembre / *September* 14, 2025

Publicado / *Published*: Diciembre 30, 2025 (Número 1, Enero-Junio 2026) / *December 30, 2025 (Number 1, January-June 2026)*

Resumen

El presente estudio evalúa el impacto del uso de cubrebocas en la propagación de enfermedades infecciosas mediante un modelo de autómatas celulares implementado en una unidad de procesamiento de gráficos, UPG (GPU, Graphics Processing Unit, en inglés) con una arquitectura de dispositivos unificados de computación, ADUC (CUDA, Compute Unified Device Architecture, en inglés). El objetivo principal de este trabajo fue analizar de qué manera ciertas medidas de protección individuales, como el uso de cubrebocas, afectan la dinámica epidémica en una población bidimensional de 1000 x 1000 individuos. Para ello se consideran parámetros como el tiempo de recuperación (T_{rem}), la duración de la inmunidad (T_{imu}) y el porcentaje de adopción de cubrebocas (M). La metodología emplea reglas locales de transmisión basadas en probabilidades diferenciadas según el uso de cubrebocas, simulando escenarios con condiciones de frontera periódicas y hasta de 100,000 pasos temporales. Los resultados revelan que un mayor porcentaje de uso de cubrebocas reduce significativamente el pico de infecciones y puede transformar un régimen endémico en uno de extinción. Sin embargo, se observa que el uso universal de cubrebocas, aunque disminuye la transmisión, puede retrasar la adquisición de inmunidad colectiva, lo que resalta la necesidad de complementar estas medidas con estrategias como la vacunación. Este modelo, al ser visual y flexible, facilita la comprensión de conceptos epidemiológicos complejos y permite explorar escenarios hipotéticos para evaluar la eficacia de diferentes intervenciones. Las conclusiones subrayan la importancia de adoptar un enfoque integral que combine medidas de protección, inmunización y políticas de salud pública para mitigar la propagación de virus de manera efectiva.

Palabras clave: Autómatas celulares, epidemiología, cubrebocas, arquitectura de dispositivos unificados de computación ADUC, propagación de virus

Abstract

This study evaluates the impact of face mask usage on the spread of infectious diseases using a cellular automata model implemented on GPU (Graphics Processing Unit) with CUDA (Compute Unified Device Architecture). The main objective is to analyze how individual protective measures, such as mask-wearing, affect epidemic dynamics in a two-dimensional population of 1000x1000 individuals, considering parameters such as recovery time (T_{rem}), immunity duration (T_{imu}), and the percentage of mask adoption (M). The methodology employs local transmission rules based on differentiated probabilities according to mask usage, simulating scenarios with periodic boundary conditions and up to 100,000 time steps. The results show that a higher percentage of mask usage significantly reduces the peak of infections and can shift the propagation regime from endemic to extinction. However, universal mask usage, while reducing transmission, may delay the acquisition of herd immunity, highlighting the need to complement these measures with strategies such as vaccination. The model, being visual and flexible,

facilitates the understanding of complex epidemiological concepts and allows exploring hypothetical scenarios to assess the effectiveness of different interventions. The conclusions emphasize the importance of adopting a comprehensive approach that combines protective measures, immunization, and public health policies to effectively mitigate virus spread.

Keywords: Cellular automata, epidemiology, face masks, Compute Unified Device Architecture CUDA, virus propagation

Introducción

Entre las enfermedades que han recibido especial atención en los últimos años, figura el SARS-CoV-2⁵, desde su fuerte impacto mundial hasta la dificultad de modelizar su propagación de forma realista. Numerosos trabajos han abordado este tema. Una parte importante de ellos se ha centrado en el estudio de las medidas de protección, planteando preguntas fundamentales como: ¿Son realmente eficaces? (Li, 2020; Liao, 2021), ¿En qué medida funcionan de manera individual o en combinación con otras medidas? (Chen, 2021; Kwon et al., 2021; Park y Kim, 2021), ¿Sobre qué fracciones de la población conviene aplicarlas para que resulten efectivas? (Esposito y Principi, 2020; Xu et al., 2024). A estas dificultades se añade la necesidad de convencer a la población de la utilidad de dichas medidas, puesto que su eficacia depende directamente de la aceptación y la adopción colectiva (Betsch, 2020; Cherry et al., 2021; Wang et al., 2020; Yan et al., 2021).

Para describir la propagación de enfermedades tipo SARS-CoV-2 existen modelos que proponen un marco matemático para integrar la dinámica de aerosoles y de gotas (los dos vectores contemplados para explicar la transmisión del virus), las tasas de ventilación y las características de exposición con el fin de cuantificar el riesgo de transmisión del SARS-CoV-2 (Mittal et al., 2020; Peng y Jimenez, 2021). Sin embargo, dichos modelos se centran principalmente en la interacción directa entre dos individuos, lo que dificulta su extrapolación a poblaciones numerosas y complica su comprensión por parte del público en general, destinatario final del uso de cubrebocas. Una solución para resolver estas dificultades es el uso de autómatas celulares.

Los autómatas celulares son sistemas dinámicos 'discretos'⁶ formados por una red de celdas, cada una de las cuales puede encontrarse en un número finito de estados (Wolfram, 1983). La evolución del sistema se rige por reglas locales simples, que determinan el estado futuro de cada celda en función de su estado actual y el de sus vecinas. A pesar de la simplicidad de estas reglas, los autómatas celulares son capaces de generar dinámicas colectivas complejas, lo que los convierte en una herramienta poderosa para el estudio de sistemas fuera de equilibrio (Wolfram, 1984). Este tipo de modelos ha sido utilizado durante varias décadas para explorar fenómenos dinámicos muy diversos, entre ellos la propagación de virus informáticos (Batista, 2017), la dinámica del tráfico vehicular (Maerivoet y De Moor, 2005), la dinámica de la vegetación (Balzter et al., 1998) o, de manera más amplia, la difusión de enfermedades infecciosas (Beauchemin et al., 2005; Sirakoulis et al., 2000; Xiao et al., 2006; Zhao et al., 2015; Zorzenon dos Santos y Coutinho, 2001). En el campo de la epidemiología, un ejemplo clásico de modelo es el SIR⁷, introducido por Kermack y McKendrick en 1927, que describe la evolución temporal de una epidemia mediante la división de la población en compartimentos de susceptibles, infectados y recuperados.

⁵ Todos los acrónimos que aparecen en este documento están definidos en un glosario al final

⁶ Discreto es una palabra usada por los matemáticos para separados (*discrete* en inglés es separado, mientras que *discreet* en inglés es discreto) [Nota de los(as) editores(as)]

⁷ El modelo SIR (Susceptible, Infectado, Recuperado/Removido) es un modelo matemático fundamental en epidemiología, introducido por William Kermack y Alexander McKendrick en 1927, que describe la propagación de enfermedades infecciosas dividiendo a la población en tres compartimentos y explicando cómo la inmunidad y la recuperación afectan el curso de una epidemia (Abelló-Ugalde Isidro Alfredo, Guinovart-Díaz Raúl, Morales-Lezca Wilfredo. 2020. El modelo SIR básico y políticas antiepidémicas de salud pública para la COVID-19 en Cuba / *The Basic SIR Model and Antiepidemic Policies in Public Health against COVID-19 in Cuba*. Revista Cubana de Salud Pública. 46(Supl. especial): e2597, 1-24. Artículo especial. <https://www.scielosp.org/pdf/rcsp/2020.v46suppl1/e2597/es>)

Los autómatas celulares ofrecen un marco idóneo para estudiar estas cuestiones (del Rey, 2009; Jithesh, 2021), ya que permiten integrar parámetros ‘discretos’⁸ como las probabilidades de contagio, la duración de la inmunidad o el tiempo de recuperación. Además, su carácter visual y su flexibilidad facilitan la exploración de escenarios hipotéticos del tipo what if, en los que se analiza, por ejemplo, el efecto de variar la proporción de personas que utilizan cubrebocas o de modificar la duración de la inmunidad adquirida. Sin embargo, una de las principales dificultades radica en la obtención de probabilidades de transmisión fiables, esenciales para implementar y calibrar el modelo de manera realista.

Durante la pandemia de SARS-CoV-2, la información para la población al respecto se transmitió mayoritariamente mediante infografías, un formato directo y accesible que facilita la difusión del mensaje, como la presentada en la Figura 1. Diversos estudios han mostrado que el uso de cubrebocas por parte del individuo susceptible e infectado (P_{MM}) reduce significativamente la concentración de partículas virales exhaladas y la exposición a estas (Howard et al., 2021). En contraste, cuando solamente el infectado utiliza cubrebocas (P_{MN}) la reducción es menor, aunque sigue siendo considerable, ya que se limita la emisión en la fuente (Ueki et al., 2020).

Por otra parte, si solamente el individuo susceptible porta mascarilla (P_{NM}), la eficacia depende de la capacidad de filtración y ajuste del cubrebocas, resultando típicamente inferior al escenario anterior. Finalmente, cuando ninguno utiliza protección (P_{NN}), la probabilidad de transmisión alcanza su máximo valor (Brooks et al., 2021; Luring y Malani, 2021).

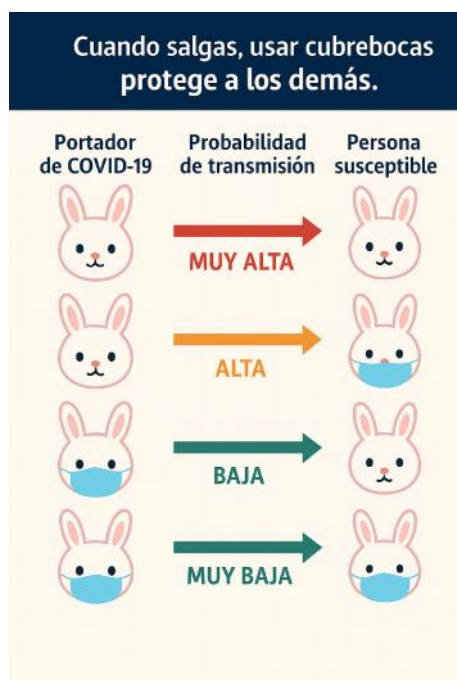


Figura 1. Infografía diseñada por los autores, inspirada en los numerosos ejemplos disponibles en Internet (medios de comunicación, universidades y gobiernos locales), dirigida al público en general y que muestra de forma esquemática el impacto del uso del cubrebocas en la transmisión del virus SARS-CoV-2 (CDMX, 2020; Coatzacoalcos, 2020; Haut-Rhin, 2021; Nebraska, 2020; Servoz, 2020)

Los valores cuantitativos de las tasas de contagio relacionadas con el uso de cubrebocas en diferentes estudios varían ampliamente debido a factores como los diseños de los estudios, las condiciones, el tipo de cubrebocas y el contexto social. Estudios indican que el uso de cubrebocas reduce hasta un 88% el riesgo de infección por SARS-CoV-2 (Tabatabaeizadeh, 2021). Otros muestran que la tasa de infección puede disminuir de un intervalo de 10 a 40% (según el contexto y tiempo de exposición) a menos del 3% con el uso adecuado de mascarillas (Klompas et al., 2020). Asimismo, la eficacia de los cubrebocas varía entre una reducción del 50 al 90% en la transmisión de aerosoles, según el tipo de

⁸ Discreto es una palabra usada por los matemáticos para separados (*discrete* en inglés es separado, mientras que *discreet* en inglés es discreto) [Nota de los(as) editores(as)]

maskarilla y su ajuste (Wang et al., 2021). Aunque la evaluación cuantitativa de las tasas de propagación muestra cierta variabilidad en los valores reportados para los diferentes escenarios contemplados (individuo infectado e individuo susceptible, con o sin cubrebocas), las probabilidades de contagio siguen el mismo orden que el presentado en la infografía de la Figura 1.

En este artículo se propone un modelo epidemiológico basado en el enfoque de autómatas celulares, aplicado al estudio del efecto de las medidas de protección individual sobre la propagación de una infección. Este modelo permite identificar la existencia de tres regímenes distintos en la dinámica de propagación del virus, que dependen del tiempo durante el cual un individuo es contagioso y del período de inmunidad: El régimen de extinción instantánea, el régimen de brote inicial seguido de extinción y el régimen endémico donde la infección persiste en la población a largo plazo. El modelo no solamente caracteriza estos tres regímenes, sino que también evalúa cómo el uso de cubrebocas modula la dinámica de propagación del virus, alterando los valores críticos de inmunidad y recuperación que definen las fronteras entre la extinción rápida, el brote seguido de extinción y la propagación endémica. Para optimizar la eficiencia computacional, el modelo se implementó en la arquitectura de dispositivos unificados de computación, ADUC (CUDA, Compute Unified Device Architecture, en inglés) aprovechando el cómputo paralelo de las tarjetas gráficas, lo que permite explorar un amplio conjunto de escenarios con un consumo reducido de recursos y tiempo de cálculo.

Modelo

Se desarrolló un modelo numérico para simular la propagación de una enfermedad infecciosa en una población bidimensional de 1000x1000 individuos. La simulación se implementa mediante autómatas celulares y está paralelizada en una unidad de procesamiento de gráficos, UPG (GPU, Graphics Processing Unit, en inglés) usando la arquitectura de dispositivos unificados de computación, ADUC (CUDA, Compute Unified Device Architecture, en inglés), lo que permite estudiar poblaciones grandes de manera eficiente. Cada individuo puede encontrarse en uno de tres estados: Susceptible, infectado o inmunizado y, adicionalmente, puede portar un cubrebocas, lo que influye en la probabilidad de transmisión.

a) Inicialización de la población

Al inicio de la simulación, un porcentaje del 10% de los individuos se selecciona aleatoriamente como infectados, mientras que un porcentaje M de los individuos porta un cubrebocas. Estas asignaciones se realizan de manera independiente para reflejar situaciones realistas en las que el uso de cubrebocas no está correlacionado necesariamente con el estado de infección.

b) Dinámica temporal de infección

El modelo evoluciona en pasos 'discretos'. Se consideran un máximo de 10^5 pasos de tiempo, a menos que el número de infectados caiga a 0. Se emplean condiciones de frontera periódicas, así que el sistema no está limitado en sus extremidades. La propagación de la infección se calcula considerando los 8 vecinos más cercanos de cada individuo.

La probabilidad de transmisión depende tanto del uso de cubrebocas del individuo susceptible como del vecino infectado. Se definen cuatro probabilidades distintas (Tabla 1).

Tabla 1. Posibilidades de transmisión

Individuo susceptible (i)	Vecino infectado (j)	Probabilidad de transmisión P_{ij}
Sin cubrebocas	Sin cubrebocas	$P_{NN}=60\%$
Sin cubrebocas	Con cubrebocas	$P_{MN}=30\%$
Con cubrebocas	Sin cubrebocas	$P_{NM}=40\%$
Con cubrebocas	Con cubrebocas	$P_{MM}=10\%$

Se adopta para el modelo el orden dado en los estudios experimentales y epidemiológicos que respaldan la relación de orden $P_{MM} < P_{MN} < P_{NM} < P_{NN}$.

Cada individuo mantiene dos contadores internos:

counter_infect, que registra el tiempo que un individuo ha estado infectado,

counter_susc, que contabiliza el tiempo de inmunidad tras la recuperación.

Cada paso temporal sigue las siguientes reglas (Figuras 2 y 3):

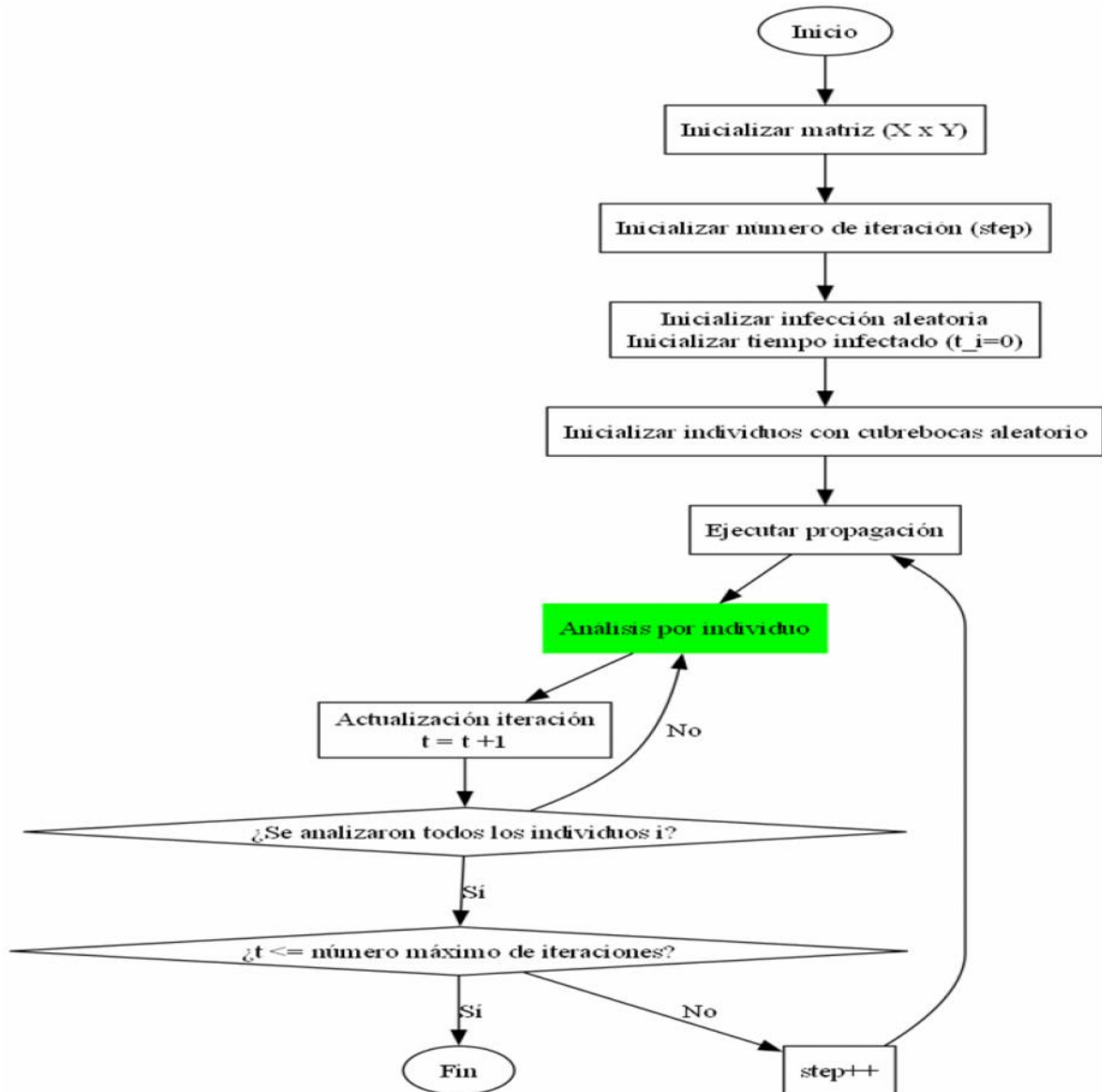


Figura 2. Diagrama de propagación del virus

1. Individuo infectado: Se incrementa de uno su contador de infección (counter_infect). Cuando este alcanza un valor T_{rem} dado, el individuo se recupera (no puede contagiar más a sus vecinos) y pasa a un estado inmunizado temporal (su valor de counter_susc se inicializa en 0)
2. Individuo inmunizado: Se incrementa su contador de inmunidad hasta llegar a un cierto valor T_{inmu} después del cual vuelve a ser susceptible

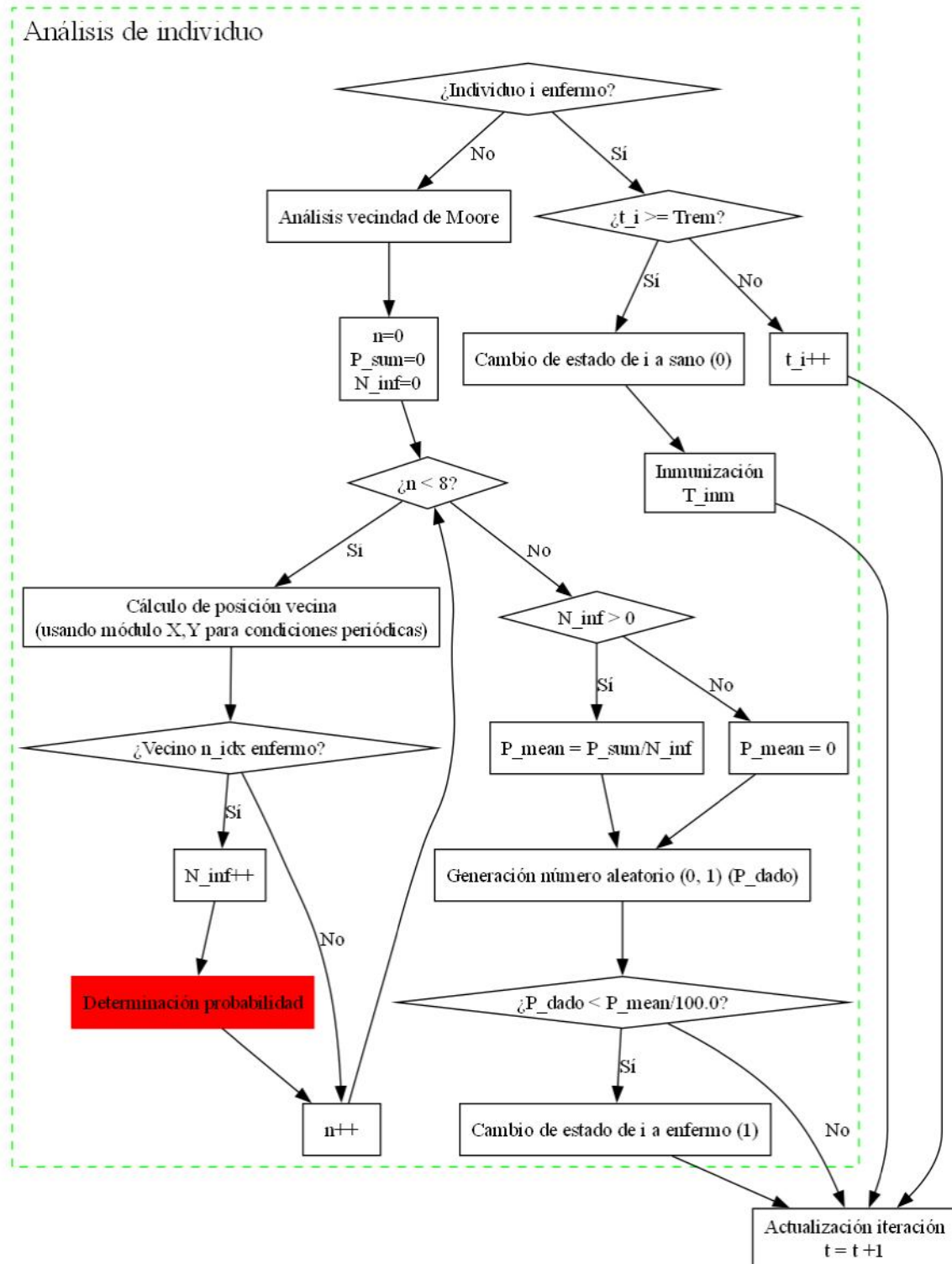


Figura 3. Diagrama de flujo función análisis de individuo

3. Individuo susceptible: Se evalúa el estado de los 8 vecinos más cercanos (Figura 4).

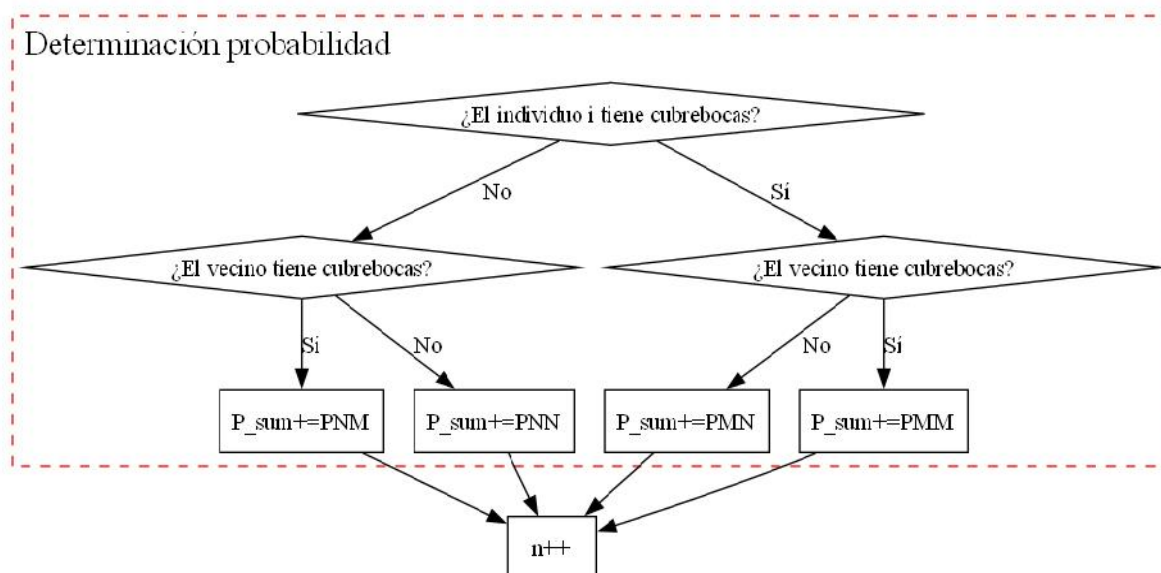


Figura 4: Diagrama de flujo función determinación de probabilidad

Si hay al menos un vecino infectado, se calcula la probabilidad promedio de infección considerando los estados de cubrebocas y se compara con un número aleatorio generado de manera paralela en GPU mediante CURAND. Si el número aleatorio es menor que la probabilidad de infección, el individuo se infecta y se incrementa su contador de infección. Específicamente, la probabilidad de infección se encuentra con la expresión (1).

$$P_i = \frac{\sum_{j \text{ infectados}} P_{ij}}{N_{\text{infectados}}} \quad (1)$$

donde P_{ij} depende del estado de cubrebocas del individuo i y de cada uno de los vecinos j . Los valores de transmisión considerados son los siguientes:

El modelo permite explorar cómo la duración de la infección (T_{rem}), la inmunidad temporal (T_{inmu}) y la distribución de cubrebocas (M) afectan la dinámica de la epidemia.

T_{rem} (Tiempo de recuperación): Número de pasos durante los cuales un individuo permanece infectado y puede transmitir la infección a sus vecinos antes de recuperarse. Un aumento de T_{rem} incrementa la agresividad de la propagación

T_{inmu} (Duración de inmunidad): Número de pasos durante los cuales un individuo recuperado permanece inmunizado antes de volver a ser susceptible. La inmunidad es la misma para todos los individuos. Un aumento de T_{inmu} limita la propagación de la enfermedad, ya que los individuos recuperados no pueden actuar como vectores durante este período. Una inmunidad larga puede simular por ejemplo la aplicación de una vacuna

M (Porcentaje de individuos con cubrebocas): Representa la fracción de la población que porta cubrebocas (fijo a lo largo de la simulación). Un aumento de M reduce la probabilidad de transmisión promedio, disminuyendo la propagación de la enfermedad en la población.

Resultados y discusión

A continuación, se presentan los resultados del modelo, comenzando con los resultados brutos que proporciona: El número de infectados con respecto del tiempo.

a) Porcentaje de infectados vs. tiempo

La Figura 5 muestra la evolución temporal del porcentaje de infectados en la población bajo distintas combinaciones de parámetros de duración de la infección T_{rem} y de la inmunidad T_{inmu} , con $M=0\%$ (sin uso de cubrebocas). El eje horizontal, en escala logarítmica, representa el tiempo (pasos de simulación), mientras que el eje vertical indica el porcentaje de individuos infectados, también en escala logarítmica.

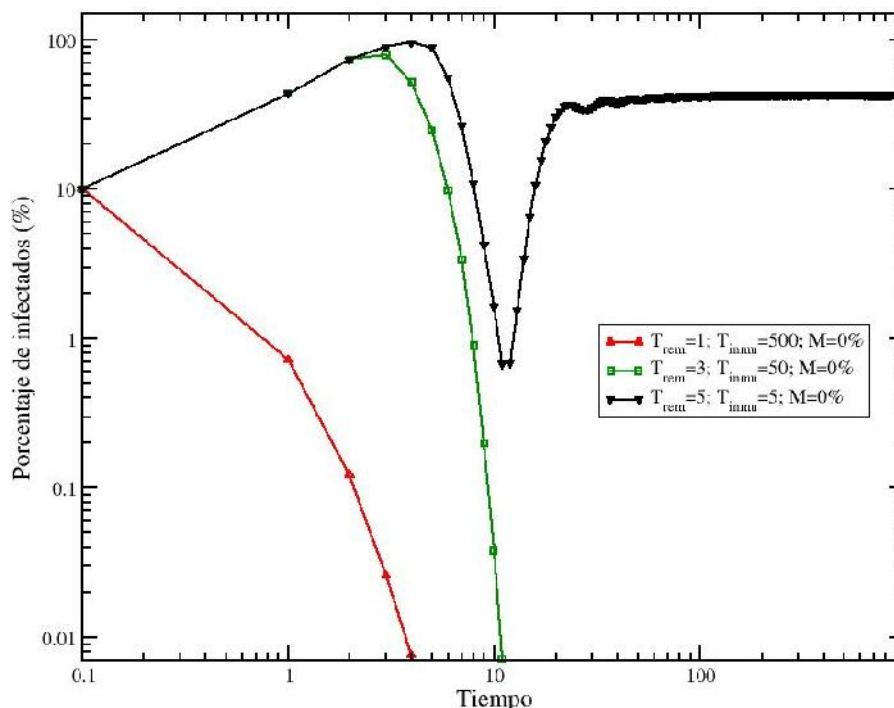


Figura 5: Porcentaje de infectados en función del tiempo para tres conjuntos diferentes de parámetros T_{rem} y T_{inmu} . En los tres casos se considera que ningún individuo usa cubrebocas. El primer caso ($T_{rem}=1$, $T_{inmu}=500$) corresponde a una infección poco agresiva, que genera una inmunidad fuerte. El segundo caso ($T_{rem}=3$, $T_{inmu}=50$) es intermedio: La infección es relativamente agresiva, pero la inmunidad sigue siendo fuerte. En el tercer caso ($T_{rem}=5$, $T_{inmu}=5$), la enfermedad es agresiva (un individuo infectado puede contagiar a sus vecinos durante un tiempo considerable) y, una vez recuperado, puede reinfectarse rápidamente.

La curva roja, correspondiente a $T_{rem}=1$ y $T_{inmu}=500$, muestra que la epidemia desaparece rápidamente. Con un tiempo de infección extremadamente corto, los individuos dejan de ser contagiosos casi de inmediato y, gracias a la inmunidad prolongada, los recuperados permanecen protegidos durante toda la simulación, lo que evita rebotes. En contraste, la curva verde ($T_{rem}=3$, $T_{inmu}=50$) refleja un crecimiento inicial acelerado de los contagios, que alcanza un pico cercano al 100% de infectados antes de caer abruptamente. Aunque la infección se propaga más que en el caso anterior, la inmunidad relativamente larga impide la reinfección temprana de los recuperados y conduce, finalmente, a la extinción del brote. La curva negra ($T_{rem}=5$, $T_{inmu}=5$) describe un escenario distinto: La epidemia se expande rápidamente hasta cubrir casi a toda la población y, tras una caída inicial, no desaparece, sino que se estabiliza en un nivel elevado. Esta dinámica se explica por la inmunidad muy corta, que permite que los individuos recuperados vuelvan a ser susceptibles en pocas iteraciones, manteniendo así la circulación del virus de manera indefinida y dando lugar a un comportamiento endémico.

La Figura 6 ilustra la existencia de tres regímenes. El primero corresponde a una decaída instantánea de la infección. El segundo se caracteriza por un brote inicial seguido de una extinción completa.

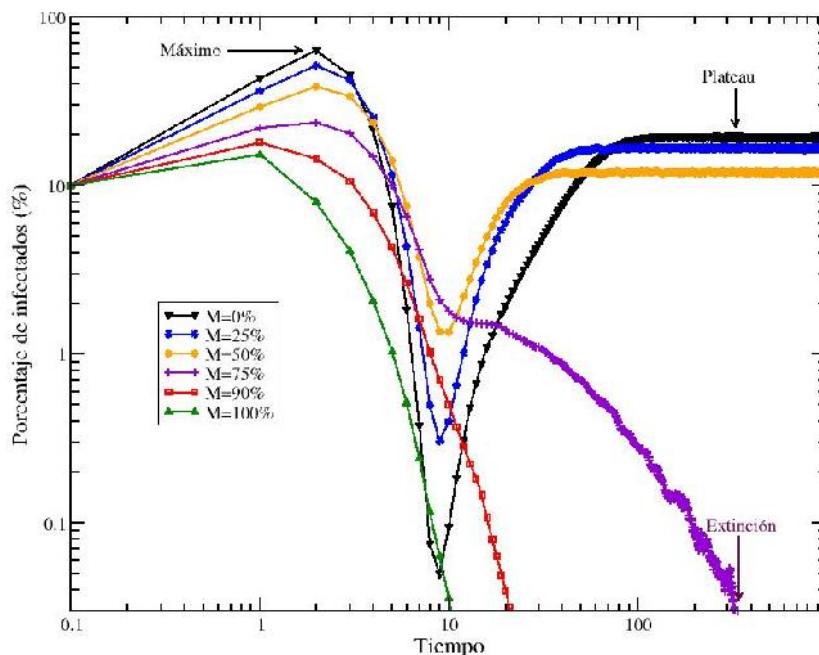


Figura 6: Porcentaje de infectados en función del tiempo. Los colores representan diferentes porcentajes de población con cubrebocas M . Todas las curvas corresponden a $T_{rem}=2$ y $T_{inmu}=5$. Se indican con flechas tres puntos importantes que se analizarán a continuación para estudiar el efecto de los cubrebocas. El primero, denominado "Máximo", corresponde al valor máximo de infectados alcanzado. El segundo, denominado "Plateau", es (cuando existe) el porcentaje de población infectada en el estado estacionario del régimen endémico. Finalmente, el punto denominado "Extinción" corresponde (cuando ocurre) al caso en que la infección desaparece

Finalmente, el tercer régimen muestra un brote inicial que conduce a una estabilización alrededor de un valor plateau (presión constante que se mantiene en vía aérea cuando el flujo de aire se detiene brevemente "pausa inspiratoria").

La Figura 6 muestra cómo el aumento de la población que utiliza cubrebocas permite reducir el impacto del contagio e incluso pasar de un régimen endémico a uno de brote inicial seguido de extinción. En el régimen endémico ($M=50\%$), un mayor uso de medidas de protección en la población permite disminuir tanto el pico inicial del brote como el valor final en el estado estacionario (plateau). En el régimen de extinción ($M=75\%$), se observa igualmente la disminución del brote inicial, así como, la reducción del tiempo de duración de la infección.

En un segundo paso, se representan los distintos regímenes en función de los valores de T_{rem} y T_{inmu} , y se analizan e interpreta la influencia del porcentaje de población con tapabocas sobre dichos regímenes. Finalmente, se cuantifica el efecto del uso de medidas de protección sobre los valores máximos y finales del porcentaje de infectados.

b) Régimen de propagación del virus

Las Figuras 7, 8 y 9 muestran los distintos regímenes de propagación del virus en función de los parámetros T_{rem} y T_{inmu} . Cada gráfica corresponde a una tasa diferente de uso de medidas de protección. Para un valor bajo de T_{rem} , se observa el régimen de caída instantánea de la tasa de infectados. Este régimen aparece bajo las mismas condiciones, independientemente del porcentaje de uso de cubrebocas y del tiempo de inmunidad, correspondiente a infecciones poco agresivas ($T_{rem}=1$).

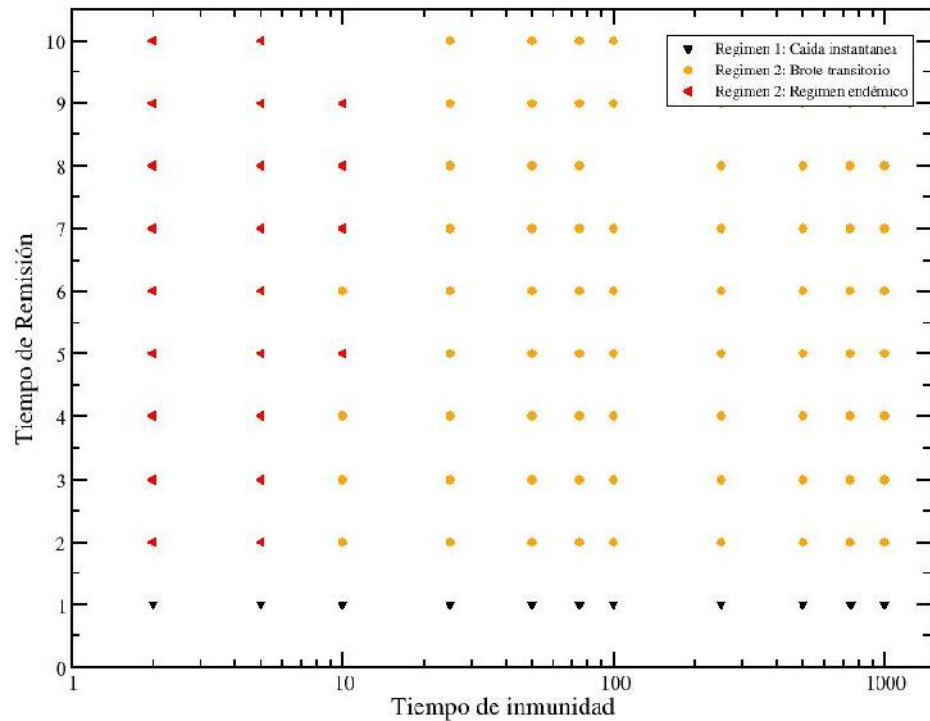


Figura 7: Para $M = 0\%$, inmunidades pequeñas conducen a regímenes endémicos, ya que el tiempo no es suficiente para que todos los individuos estén en un estado de inmunidad y la enfermedad se extinga. Sin embargo, para inmunidades cada vez más grandes, esto es cada vez más probable

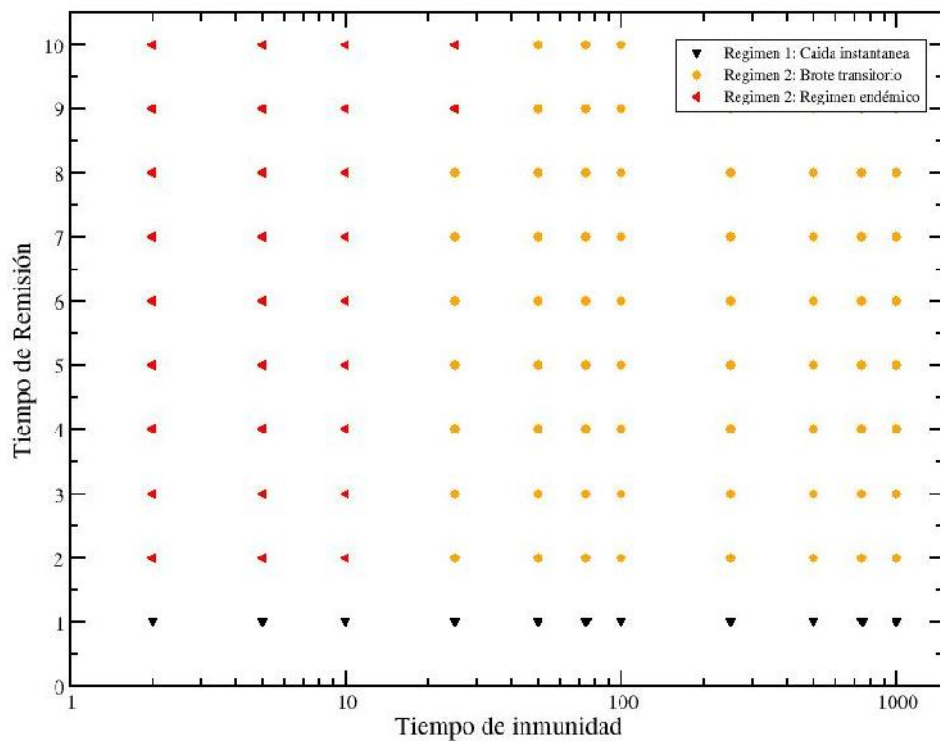


Figura 8: Para $M = 50\%$ con inmunidades menores a 10 pasos, se llega a regímenes endémicos sin importar el tiempo de remisión. Habiéndose desplazado hacia inmunidades más altas este régimen en comparación con la Figura 3. sugiere una menor cantidad de infecciones y por ello, un menor número de individuos inmunizados

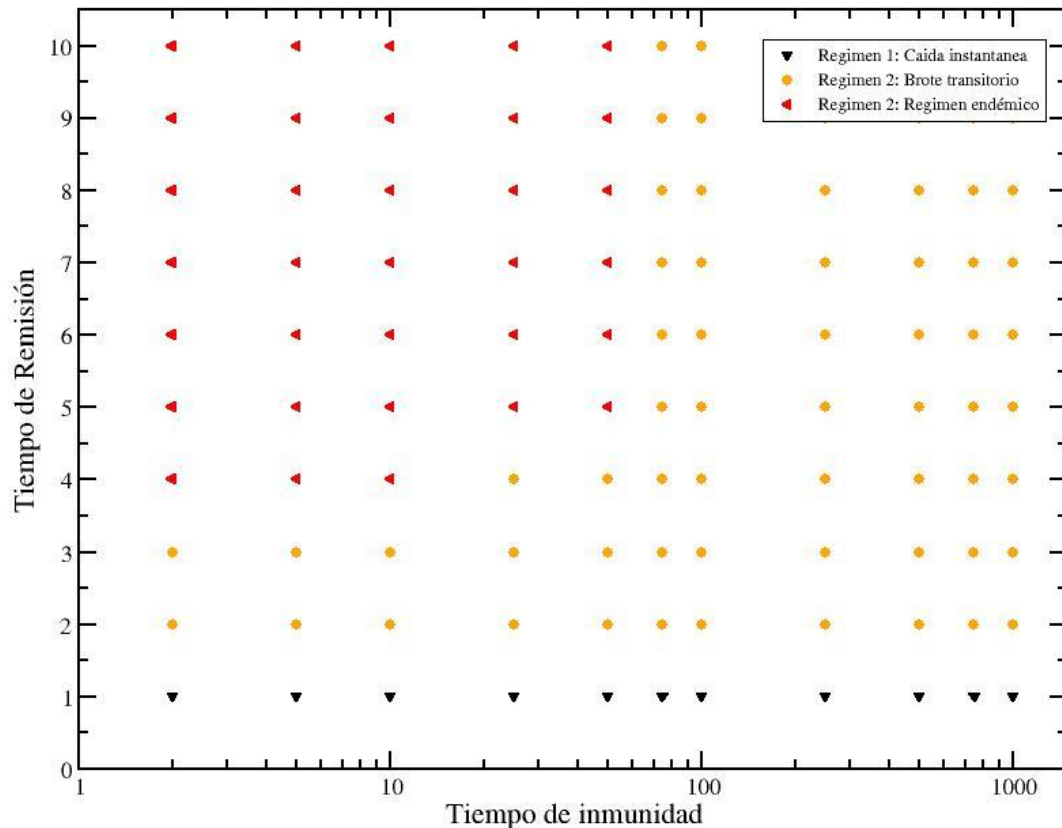


Figura 9: Para $M = 100\%$, se requiere una mayor inmunidad para llegar a un brote transitorio pues los individuos se infectan en menor medida, por consiguiente, hay un menor número de individuos que adquieren inmunidad y la enfermedad prolifera en un estado de pseudo equilibrio. Esto también refuerza la idea de la necesidad de la vacunación como forma segura y controlada para obtener inmunidad

Cuando la enfermedad es más agresiva, se observa el régimen endémico para valores bajos de T_{inmu} y el régimen de extinción tras un brote inicial para valores más altos de T_{inmu} . Al aumentar M , se nota la desaparición completa del régimen endémico para los valores más bajos de T_{rem} . El uso de medidas de protección limita la propagación de la infección, que no persiste mucho tiempo debido a un T_{rem} relativamente bajo, permitiendo alcanzar la extinción.

De manera contraintuitiva, para $M=100\%$, la frontera entre los regímenes endémico y de extinción se desplaza hacia valores mayores de T_{inmu} . Esto se debe a que la inmunidad se adquiere únicamente después de una infección. Con los cubrebocas, disminuye la probabilidad de infectarse, pero nunca llega a cero y con ello, la tasa de infección también disminuye, pero al mismo tiempo, los individuos no adquieren inmunidad.

Con respecto del estudio cuantitativo del efecto del porcentaje de individuos con cubrebocas sobre la propagación de la infección y otros parámetros relevantes, la Figura 10 representa la tasa máxima de infección observada en función de M , para diferentes valores de T_{rem} y T_{inmu} . Como se puede intuir, el valor máximo de infectados aumenta cuando el T_{rem} se incrementa. Un individuo infectado dispone de más tiempo para contagiar a sus vecinos cuando T_{rem} es mayor; por lo tanto, no resulta sorprendente que la tasa máxima crezca a medida que la infección se vuelve más agresiva. Por otra parte, se observa un efecto significativo de la presencia de medidas de protección en la población: El valor máximo puede disminuir, por ejemplo, de 95 a 45 % en el caso $T_{rem}=5$. Estos valores son congruentes con los reportados por Kwon et al. (2021). Notablemente, no se observa efecto de T_{inmu} sobre la tasa máxima de infectados, ya que se trata del brote inicial, durante el cual la inmunidad (que se adquiere tras la infección de un individuo) aún no ha entrado en juego. Cabe destacar que el valor máximo más

pequeño observado es del 10 %, dado que este es el valor inicial que se decidió usar para todas las simulaciones. Este análisis permite, además de estudiar la amplitud de la infección, evaluar otros aspectos de la propagación, como la duración del brote y la persistencia de la infección bajo diferentes escenarios de protección colectiva.

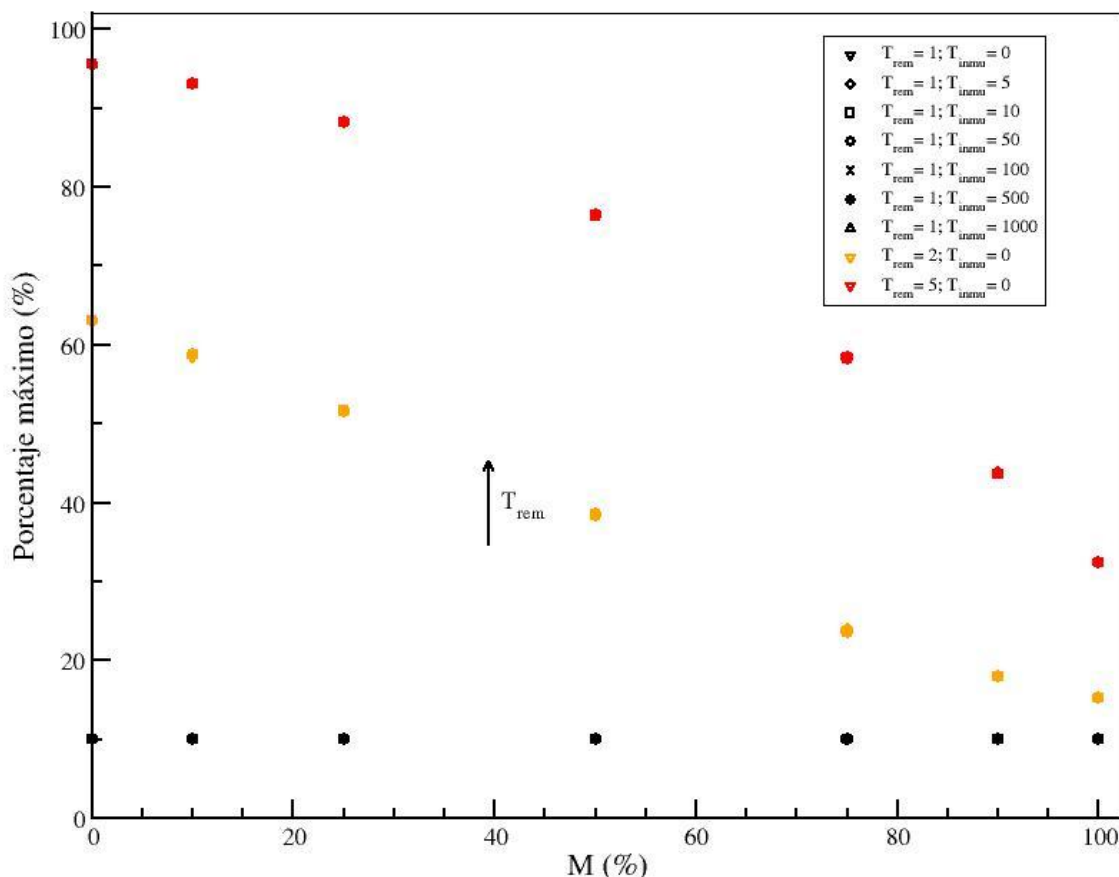


Figura 10: Porcentaje máximo de infectados contra porcentaje de individuos con cubrebocas. Los colores corresponden a diferentes valores de T_{rem} y los símbolos a diferentes valores de T_{inmu} .

La misma observación se puede realizar en la Figura 11, que muestra el porcentaje de individuos infectados a largo plazo. Un valor de 0 indica que la infección se ha extinguido. Se observa que el aumento de T_{rem} eleva el porcentaje final de infectados, desplazando el sistema del régimen de extinción al régimen endémico. Por otro lado, es evidente el efecto del aumento de M , que provoca una marcada disminución del porcentaje estacionario de infectados. Asimismo, el incremento de T_{inmu} , parámetro que actúa a tiempos prolongados, también conduce a una reducción del porcentaje final de infectados.

Finalmente, se analizó el efecto de los parámetros sobre el tiempo de extinción de la infección, cuando este existe (es decir, si no se encuentra en el régimen endémico). Se observa en la Figura 12 que, al aumentar T_{rem} o disminuir T_{inmu} , el tiempo de extinción se incrementa. El comportamiento con respecto al porcentaje de individuos que usan cubrebocas resulta más sorprendente.

El efecto de M se manifiesta de dos maneras diferentes: Limitando la propagación directa de la infección; por otro, al hacerlo, retrasa la activación de la inmunidad, la cual solo se induce tras una infección previa. Por esta razón, en el caso $T_{rem} = 2$, se observa un aumento del tiempo de extinción con M , seguido de una ligera disminución.

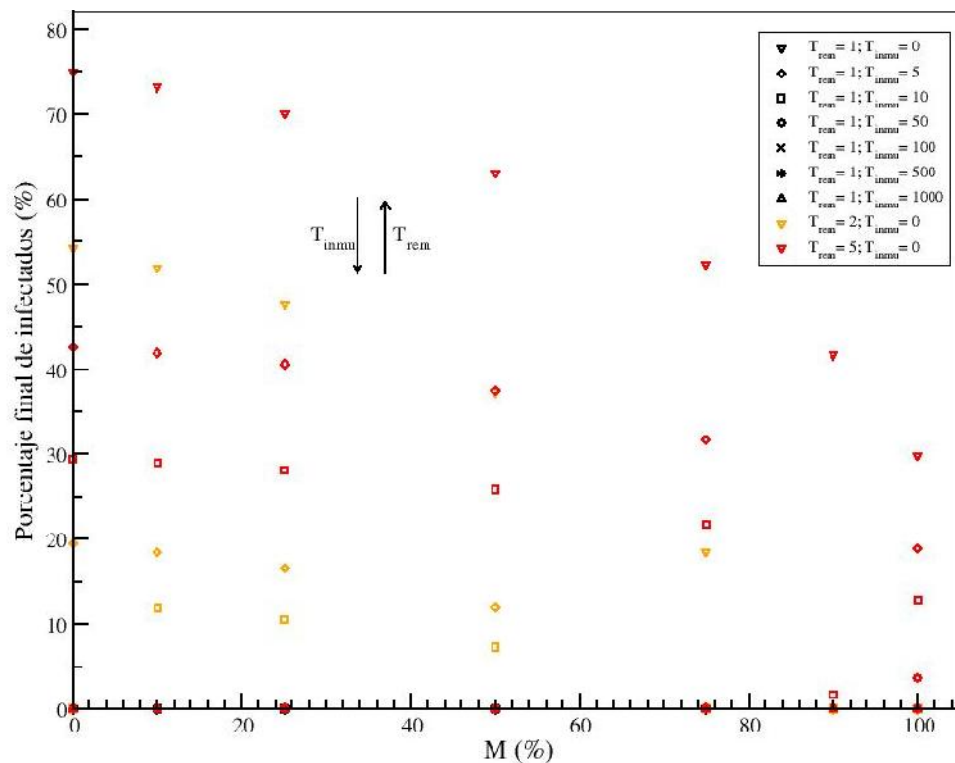


Figura 11: Porcentaje final de infectados contra porcentaje de individuos con cubrebocas. Los colores corresponden a diferentes valores de T_{rein} y los símbolos a diferentes valores de T_{inmu}

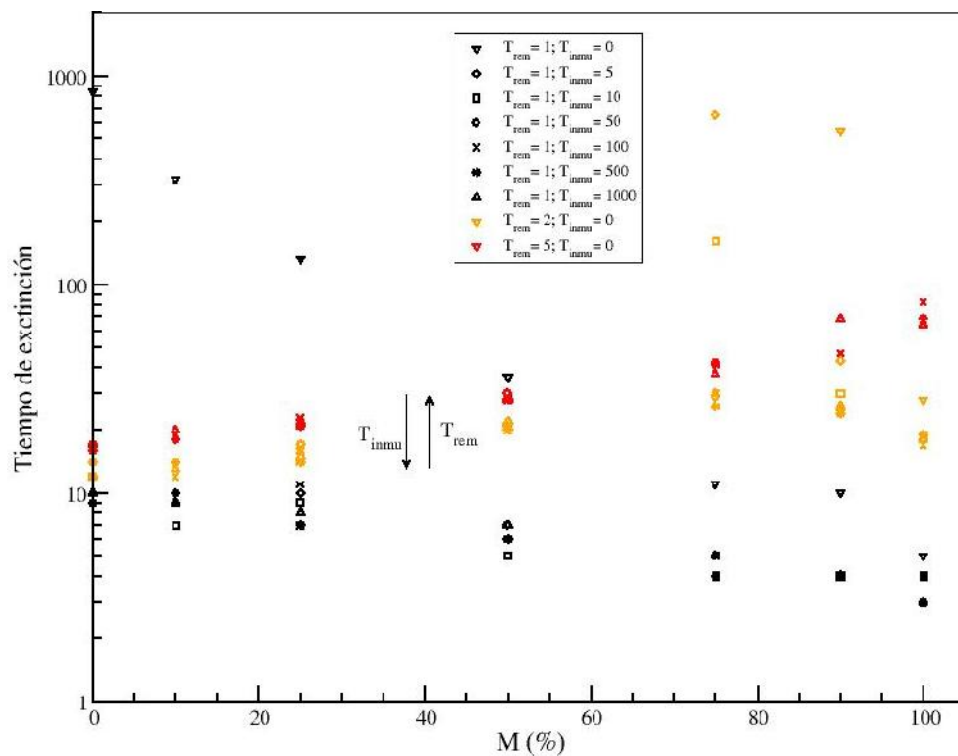


Figura 12. Tiempo de extinción vs. porcentaje de individuos con cubrebocas. Los colores corresponden a diferentes valores de T_{rein} y los símbolos a diferentes valores de T_{inmu}

Los resultados presentados son de un modelo simplificado de propagación de una infección, destacando el efecto de una proporción variable de individuos que cuentan con un medio de protección (como los cubrebocas). Se mostró que las propiedades de la infección determinan su tasa de propagación, la cual puede clasificarse en tres regímenes.

Además, se observó cómo el uso de medidas de protección individuales permite pasar de un régimen a otro más favorable desde el punto de vista epidemiológico, así como reducir los efectos de la infección tanto en términos de porcentaje de infectados como de duración. Un modelo simplificado de este tipo, presenta la ventaja de poder ser fácilmente comprendido por la población en general, sin requerir conocimientos previos en probabilidades. Al mismo tiempo, puede ser enriquecido con consideraciones más específicas para hacerlo más preciso, combinando así simplicidad, efectividad y versatilidad.

Conclusión

El modelo desarrollado mediante autómatas celulares e implementado en GPU con CUDA permitió analizar de manera eficiente el efecto del uso de cubrebocas sobre la propagación de una enfermedad infecciosa. Los resultados mostraron que parámetros como la duración de la infección (T_{rem}) y de la inmunidad ($T_{ inmu}$) determinan la dinámica global, dando lugar a tres regímenes distintos: Extinción rápida, brote seguido de extinción y propagación endémica.

Dentro de este marco, se observó que el incremento en la proporción de individuos que utilizan cubrebocas reduce de forma significativa tanto el pico inicial de contagios como el porcentaje de infectados en el estado estacionario, pudiendo incluso desplazar al sistema desde un régimen endémico hacia la extinción. No obstante, se evidenció también que un uso universal de cubrebocas, aunque disminuye la probabilidad de infección, puede retrasar la adquisición de inmunidad colectiva, lo que resalta la necesidad de medidas complementarias como la vacunación.

En conjunto, el estudio confirma la eficacia de las medidas de protección individuales como herramienta para mitigar la propagación de virus, al tiempo que subraya la importancia de una estrategia integral que combine barreras físicas, inmunización y políticas de salud pública. Además, la simplicidad y flexibilidad del modelo lo convierten en un recurso valioso tanto para la exploración académica como para la comunicación de conceptos epidemiológicos al público en general.

Glosario

Acrónimo	Significado
counter_infect	Variable que registra el tiempo que un individuo ha estado infectado
counter_susc	Variable que contabiliza el tiempo de inmunidad tras la recuperación
Covid-19	Coronavirus disease 2019 (enfermedad del Coronavirus 2019)
CUDA	Compute Unified Device Architecture
CURAND	"CURAND" se refiere más comúnmente a cuRAND de NVIDIA, una biblioteca de alto rendimiento para la generación de números aleatorios (RNG, random numbers generation acelerada por GPU utilizada en aplicaciones CUDA
GPU	Graphics Processing Unit (unidad de procesamiento de gráficos)
M	Porcentaje de individuos con cubrebocas, representa la fracción de la población que porta cubrebocas al inicio de la simulación
N_j	Número de individuos en la vecindad
NVIDIA	Empresa tecnológica estadounidense líder, conocida por diseñar potentes unidades de procesamiento gráfico (GPU) que impulsan los juegos de PC, la visualización profesional y los centros de datos. Actualmente, es una potencia clave en inteligencia artificial (IA) y computación de alto rendimiento, proporcionando hardware y software esenciales para el entrenamiento de IA, la

Acrónimo	Significado
	ciencia de datos, los vehículos autónomos y la infraestructura en la nube. Fundada en 1993, la invención de la GPU por parte de NVIDIA desencadenó la revolución de los videojuegos, y su potencia de procesamiento paralelo resultó ideal para los cálculos masivos necesarios para la IA moderna, convirtiéndola en un actor dominante en la era de la IA
P_{MM}	Probabilidad de transmisión individuo susceptible con cubrebocas e infectado con cubrebocas
P_{MN}	Probabilidad de transmisión individuo susceptible con cubrebocas e infectado sin cubrebocas
P_{NM}	Probabilidad de transmisión individuo susceptible sin cubrebocas e infectado con cubrebocas
P_{NN}	Probabilidad de transmisión individuo susceptible sin cubrebocas e infectado sin cubrebocas
P_i	Probabilidad de infección del individuo susceptible conociendo todas las contribuciones individuales
SARS-CoV-2	Siglas en inglés para Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2 (síndrome respiratorio agudo severo por coronavirus 2)
T_{inmu}	Duración inmunidad, número de pasos durante los cuales un individuo recuperado permanece inmunizado antes de volver a ser susceptible
T_{rem}	Tiempo de recuperación, número de pasos durante los cuales un individuo permanece infectado y puede transmitir la infección a sus vecinos antes de recuperarse

Reconocimientos

Los autores agradecen al Maestro Antonio Díaz García por sugerir esta revista para la publicación de este trabajo. El autor Julien-Lombard agradece a DGAPA-PAPIIT por el apoyo recibido a través del proyecto IA102824.

Referencias bibliográficas

- Balster, H., Braun, P.W., Köhler, W. 1998. Cellular automata models for vegetation dynamics. *Ecological Modelling*. 107(2-3): 113–125. doi: doi.org/10.1016/S0304-3800(97)00202-0
- Batista, F.K., Martín del Rey, A., Quintero-Bonilla, S., Queiruga-Dios, A. 2017. A SEIR model for computer virus spreading based on cellular automata. En *Proceedings International Joint Conference SOCO'17-CISIS'17-ICEUTE'17*. September 6-8, 2017. P. 641. León, España.
- Beauchemin, C., Samuel, J., Tuszynski, J. 2005. A simple cellular automaton model for influenza A viral infections. *Journal of Theoretical Biology*. 232(2):223-234. doi: 10.1016/j.jtbi.2004.08.001
- Betsch, C., Korn, L., Sprengholz, P., Böhm, R. 2020. Social and behavioral consequences of mask policies during the COVID-19 pandemic. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*⁹ (PNAS). 117(36):21851–21853. doi: doi.org/10.1073/pnas.2011674117
- Brooks, J.T., Butler, J.C., Redfield, R.R. 2021. Universal masking to prevent SARS-CoV-2 transmission—the time is now. *Journal of the American Medical Association*. 325(6): 635-636. doi: doi.org/10.1001/jama.2021.1505.
- CDMX. 2020. Publicación del Gobierno de la Ciudad de México, 9 de agosto 2020. Consultado el 13 de noviembre 2025. <https://www.facebook.com/GobiernoCDMX/posts/-usar-cubrebocas-ayuda-a-que-los-contagios-disminuyanmira-en-esta-imagen-porque-/10163980248615285/>
- Chen, Q. 2021. Can we mitigate COVID-19 spreading risk? *Frontiers of Environmental Science & Engineering*. 15: 35. doi: doi.org/10.1007/s11783-020-1328-8
- Cherry, T.L., James, A.G., Murphy, J. 2021. The impact of public health messaging and personal experience on the acceptance of mask wearing during the COVID-19 pandemic. *Journal of Economic Behavior & Organization*. 187: 415–430. doi: doi.org/10.1016/j.jebo.2021.04.006

⁹ El nombre oficial de ese país es Estados Unidos (United States). Durante la Doctrina Monroe su papel moneda fue modificado apoderándose del nombre de continente (ahora dividido en dos por el Canal de Panamá) pero no está avalado por su constitución [Nota de los(as) editores(as)]

- Coatzacoalcos. 2020. Información del Ayuntamiento de Coatzacoalcos. Consultado el 12 de noviembre de 2025. <https://www.coatzacoalcos.gob.mx/prensa/ayuntamiento-llama-a-hacer-conciencia-sobre-uso-de-cubrebocas/>
- del Rey, A.M. 2009. A Computer Virus Spread Model Based On Cellular Automata of Graphs. *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 5518. En *Proceedings Cellular Automata: 8th International Conference on Cellular Automata for Research and Industry, ACRI 2008*. Bandini, S., Umeo, H., Vizzari, G., eds. September 22-25, 2008, Yokohama, Japan.
- Esposito, S., Principi, N. 2020. To mask or not to mask children to overcome COVID-19. *European Journal of Pediatrics*. 179: 1267-1270. doi: doi.org/10.1007/s00431-020-03674-9
- Haut-Rhin. 2021. Guía oficial sobre uso de cubrebocas de la Región Haut-Rhin, Francia, 3 de diciembre de 2021. Consultado el 12 de noviembre de 2025. <https://www.haut-rhin.gouv.fr/Actualites/Archives-Coronavirus-COVID-19/Archives/Coronavirus-COVID-19-conseils-pratiques>
- Howard, J., Huang, A., Li, Z., Tufekci, Z., Zdimal, V., van der Westhuizen, H., von Delft, A., Price, A., Fridman, L., Tang, L.H., Tang, V., Watson, G.L., Bax, C.E., Shaikh, R., Questier, F., Hernandez, D., Chu, L.F., Ramirez, C.M., Rimoin, A.W. 2021. An evidence review of face masks against COVID-19. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 118(4):e2014564118. doi: doi.org/10.1073/pnas.2014564118.
- Jithesh, P.K. 2021. A model based on cellular automata for investigating the impact of lockdown, migration and vaccination on COVID-19 dynamics. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*. 211:106402. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2021.106402>
- Klompas, M., Baker, M.A., Rhee, C. 2020. Airborne transmission of SARS-CoV-2: Theoretical considerations and available evidence. *JAMA*. 324(5): 441-442. doi:10.1001/jama.2020.12458
- Kwon, S., Joshi, A.D., Lo, C.-H., Drew, D.A., Nguyen, L.H., Guo, C.-G., Ma, W., Mehta, R.S., Shebl, F.M., Warner, E.T., Astley, C.M., Merino, J., Murray, B., Wolf, J., Ourselin, S., Steves, C.J., Spector, T.D., Hart, J.E., Song, M., VoPham, T., Chan, A.T. 2021. Association of social distancing and face mask use with risk of COVID-19. *Nature Communications*. 12(1): 3737. doi: doi.org/10.1038/s41467-021-24115-7
- Lauring, A.S., Malani, P.N. 2021. Variants of SARS-CoV-2. *JAMA*. Published online. 326(9):880-880. doi:10.1001/jama.2021.14181
- Li, T., Liu, Y., Li, M., Qian, X., Dai, S.Y. 2020. Mask or no mask for COVID-19: a public health and market study. *PLoS ONE*. 15(8):e0237691. doi: doi.org/10.1371/journal.pone.0237691
- Liao, M., Liu, H., Wang, X., Hu, X., Huang, Y., Liu, X., Brenan, K., Mecha, J., Nirmalan, M., Lu, J.R. 2021. A technical review of face mask wearing in preventing respiratory COVID-19 transmission. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*. 52:101417. doi: doi.org/10.1016/j.cocis.2021.101417
- Maerivoet, S., De Moor, B. 2005. Cellular automata models of road traffic. *Physics Reports*. 419(1): 1-64. doi: doi.org/10.1016/j.physrep.2005.08.005
- Mittal, R., Meneveau, C., Wu, W. 2020. A mathematical framework for estimating risk of airborne transmission of COVID-19 with application to face mask use and social distancing. *Physics of Fluids*. 32:101903. doi: doi.org/10.1063/5.0025476
- Nebraska. 2020. Información de Nebraska Medicine, 3 de junio de 2020. Consultado el 12 de noviembre 2025. <https://www.nebraskamed.com/COVID/coronavirus-is-not-canceled-wear-your-mask>
- Park, J., Kim, G. 2021. Risk of COVID-19 infection in public transportation: the development of a model. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 18(23): 12790. doi: doi.org/10.3390/ijerph182312790
- Peng, Z., Jimenez, J.L. 2021. Exhaled CO₂ as a COVID-19 infection risk proxy for different indoor environments and activities. *Environmental Science & Technology Letters*. 8: 392-397. doi: doi.org/10.1021/acs.estlett.1c00183
- Servoz. 2020. Ayuntamiento de Servoz, Francia, 8 de mayo 2020, consultado el 12 de noviembre 2025. www.servoz.fr/distribution-de-masques
- Sirakoulis, G.Ch., Karafyllidis, I., Thanailakis, A. 2000. A cellular automaton model for the effects of population movement and vaccination on epidemic propagation. *Ecological Modelling*. 133(3): 209-223. doi: doi.org/10.1016/S0304-3800(00)00294-5
- Tabatabaeizadeh, S.A. 2021. Airborne transmission of COVID-19 and the role of face mask to prevent it: A systematic review and meta-analysis. *European Journal of Medical Research*. 26:1. doi: 10.1186/s40001-020-00475-6
- Ueki, H., Furusawa, Y., Iwatsuki-Horimoto, K., Imai, M., Kabata, H., Nishimura, H., Kawaoka, Y. 2020. Effectiveness of face masks in preventing airborne transmission of SARS-CoV-2. *mSphere*, 5(5): e00637-20. <https://doi.org/10.1128/mSphere.00637-20>
- Wang, C.C., Prather, K.A., Sznitman, J., Jimenez, J.L., Lakdawala, S.S., Tufekci, Z., Marr, L.C. 2021. Airborne transmission of respiratory viruses. *Science*. 373(6558): doi:10.1126/science.abd9149
- Wang, J., Pan, L., Tang, S., Ji, J.S., Shi, X. 2020. Mask use during COVID-19: a risk adjusted strategy. *Environmental Pollution*. 266(Part 1): 115099. doi: doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115099
- Wolfram, S. 1983. Statistical mechanics of cellular automata. *Reviews of Modern Physics*. 55(3):601-644.
- Wolfram, S. 1984. Cellular automata as models of complexity. *Nature*. 311: 419-424. doi: doi.org/10.1038/311419a0
- Xiao, X., Shao, S.-H., Chou, K.-C. 2006. A probability cellular automaton model for hepatitis B viral infections. *Biochemical and Biophysical Research Communications*. 342(2): 605-610. doi: 10.1016/j.bbrc.2006.01.166
- Xu, Z., Zhang, H., Zhu, M., Ji, Y., Xue, P., Xie, J., Li, Y., Zhang, N. 2024. Human behavior-based COVID-19 transmission in two dining spaces. *Journal of Hazardous Materials*. 480:135820. doi: doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135820
- Yan, Y., Bayham, J., Richter, A., Fenichel, E.P. 2021. Risk compensation and face mask mandates during the COVID-19 pandemic. *Scientific Reports*. 11(1): 3174. doi: doi.org/10.1038/s41598-021-82574-w
- Zhao, Z., Chen, Y., Wang, L., Liu, Q. 2015. A cellular automata model of Ebola virus dynamics. *Physica A*. 438: 424-435. doi: dx.doi.org/10.1016/j.physa.2015.06.049
- Zorzenon dos Santos, R.M., Coutinho, S. 2001. Dynamics of HIV infection: A cellular automata approach. *Physical Review Letters*. 87:168102. doi: doi.org/10.1103/PhysRevLett.87.168102