

MODELO CON ESTRUCTURA SOCIAL PARA EL ESTUDIO DE MEDIDAS DE CONTROL DE LA PANDEMIA DE COVID-19

Simoy Mario Ignacio^{1,2} y Aparicio Juan Pablo^{1,3}

¹*Instituto de Investigaciones en Energía no Convencional (INENCO), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Universidad Nacional de Salta, Av. Bolivia 5100, 4400 Salta, Argentina.*

²*Instituto Multidisciplinario sobre Ecosistemas y Desarrollo Sustentable, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Paraje Arroyo Seco s/n, 7000 Tandil, Argentina, ignacio.simoy@gmail.com*

³*Simon A. Levin Mathematical, Computational and Modeling Sciences Center, Arizona State University, PO Box 871904 Tempe, AZ 85287-1904, USA, juan.p.aparicio@gmail.com*

Resumen:

Los modelos matemáticos tomaron relevancia en la pandemia de COVID-19 dado que permiten explorar cómo influyen las medidas de control en la propagación de la infección. Aquí se presenta un modelo estocástico basado en agentes que permite simular la dinámica infecciosa, incorporando la estructura social de una ciudad, considerando casas, lugares de trabajos, escuelas y supermercados. Se realizaron simulaciones para evaluar el impacto en la ocupación de camas de hospital de distintas medidas de control tales como el seguimiento de contactos y aislamiento del caso, el cierre de escuelas y de lugares de trabajo. Los resultados indican que el seguimiento de contactos y aislamiento del caso no es suficiente para prevenir la saturación de camas de hospital. Además, los resultados sugieren que las escuelas son las impulsoras más significativas de la epidemia, y en algunos de los casos analizados, al cerrarlas se puede evitar el colapso del sistema de salud.

Palabras clave: *COVID-19, Modelo estocástico basado en agentes, Estructura social, Recursos hospitalarios*
2000 AMS Subject Classification: **90B15 - 92B05 - 92D25 - 92D30**

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos meses, se han desarrollado diversos modelos matemáticos para predecir tendencias futuras y explorar el efecto de diferentes medidas de distanciamiento social frente a la pandemia de COVID-19. Varios de estos modelos no incorporan de forma explícita estructuras de contacto espacial y/o social. A su vez, el efecto de las medidas de distanciamiento social es modelado variando algunos parámetros como la tasa de infección durante el curso de la epidemia (ver por ejemplo [1], [2], [3]).

En este trabajo se presenta un modelo basado en agentes (AMB) que incorpora una estructura social básica que consiste en hogares, lugares de trabajo, escuelas y supermercados o tiendas similares. Los individuos infecciosos pueden ser asintomáticos, presentar solo síntomas leves o desarrollar formas más graves de la enfermedad y, por lo tanto, buscar atención médica. Una proporción de estos últimos casos requerirá hospitalización. El objetivo es evaluar diferentes estrategias para prevenir la saturación de recursos hospitalarios en ciudades pequeñas o medianas. Las medidas de control consideradas fueron el rastreo y aislamiento de contactos y casos, el cierre de escuelas y el cierre de lugares de trabajo. En nuestro enfoque de modelado, el comienzo y la finalización de cualquiera de estas medidas están determinados por los niveles de ocupación de camas de hospital.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. ESTRUCTURA DE LA POBLACIÓN Y RUTINA DE LOS INDIVIDUOS

Se desarrolló un ABM para una población homogénea. Cada individuo fue asignado a un hogar de tamaño H . Se consideró que un porcentaje de la población asiste a alguna escuela, donde comparte el aula con otros 29 estudiantes y un docente (cada escuela está compuesta por 10 aulas). El resto de las personas se asignaron a lugares de trabajo al azar de tamaño W . Algunos de estos lugares de trabajo se consideraron tiendas, como supermercados, que son visitadas con cierta frecuencia (una tienda por cada 100 personas). Cada uno de los individuos de la población tiene una rutina dependiendo si asiste a una escuela o no. Así, los individuos comparten el día con las personas que corresponden a su casa, su trabajo/escuela y las que

se encuentran en la tienda donde hacen las compras. A su vez, durante el día las personas tienen una cierta cantidad de contactos casuales, que representan contactos en el transporte público u otras áreas públicas.

2.2. CLASES EPIDEMIOLOGICAS

En el modelo se consideraron distintas clases epidemiológicas. En la Fig. 1 se muestra el diagrama de la progresión en dichas clases. Las personas recién infectadas entran en un estado latente, el cual no es infeccioso. Luego, se vuelven infecciosos pero presintomáticos. Una proporción σ_a de los presintomáticos permanecerá asintomática o desarrollará solo síntomas muy leves. Se consideraron dos clases clínicas. Una primera clase subclínica, donde solo se observan síntomas leves, y una fase clínica donde los síntomas son evidentes. Una proporción σ_h de estos últimos casos requerirá hospitalización. Finalmente los individuos se recuperan o mueren. Se asumió que los individuos recuperados desarrollan inmunidad a largo plazo.

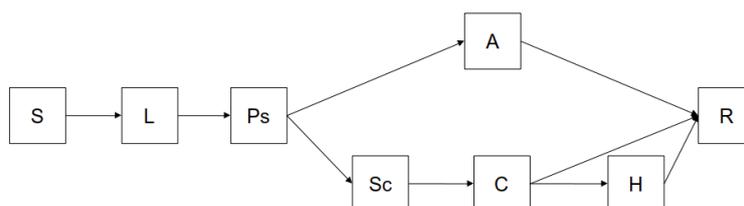


Figura 1: Progresión en las clases epidemiológicas. Susceptible (S), Latente (L), Pre-sintomático (Ps), Asintomático (A), Sub-clínico (Sc), Clínico (C), Hospitalizado (H), Recuperado (R).

Para los periodos de tiempo que los individuos permanecen en cada clase epidemiológicas se utilizaron distribuciones Gamma con media y varianza obtenidas a partir de datos disponibles en la bibliografía.

2.3. MODELIZACIÓN DE LA TRANSMISIÓN DE LA ENFERMEDAD

Se consideró que la probabilidad de transmisión por contacto por unidad de tiempo se descompone como un valor máximo (β_H) ponderado por un coeficiente ρ_j que depende del tipo de ambiente, donde $j \in \{H, W, St, S\}$, para hogares (H), lugares de trabajo (W), tiendas (St) y escuelas (S), respectivamente. El valor β_H corresponde a la probabilidad de transmisión por contacto por unidad de tiempo en un hogar y se estimó numéricamente a partir de los datos de la tasa secundaria de ataque. Se evaluaron tres casos diferentes en relación con el riesgo de infección en cada ambiente. En el primer caso se consideró que el riesgo de infección es el mismo en todos los ambientes ($\rho_j = 1$ para todo j). En los otros dos casos, se consideró un valor de $\rho_H = 1$ para las casas, $\rho_S = 1/8$ para las escuelas y $\rho_{St} = 1/4$ para las tiendas. Para los lugares de trabajo, se consideraron dos valores diferentes: $\rho_W = 1/2$ (caso 1) y $\rho_W = 1/3$ (caso 2).

2.4. MODELIZACIÓN DE LAS MEDIDAS DE CONTROL

La probabilidad de detección en un intervalo de tiempo Δ_t está dada por $1 - e^{-r_d \Delta_t}$, donde r_d es la tasa de detección. Cuando se detecta un caso, se aísla completamente su hogar (durante un período fijo de tiempo T_{ct}), así como todos sus contactos en el lugar de trabajo. Si el caso detectado asiste a una escuela o trabaja en una tienda, solo se aíslan sus contactos domésticos. Luego del periodo de aislamiento, los individuos se testean. En caso de ser positivos, continúan en aislamiento por dos días más. Cuando el test da negativo, salen del aislamiento y retoman su rutina habitual. Un cierre parcial consiste en el cierre de un porcentaje de los lugares de trabajo y/o escuelas. Estos cierres parciales comienzan cuando una fracción de las camas de hospital está ocupada y se relajan cuando se alcanza un valor más bajo para esta fracción. Las políticas de cierre modifican la rutina de las personas.

3. RESULTADOS.

Para las simulaciones se consideró una población de 100 mil habitantes distribuidos en casas de 4 personas y lugares de trabajo de 8 personas. Una persona por casa asiste a una escuela, mientras que el resto asiste a lugares de trabajo (incluidas tiendas y escuelas). En cuanto a los parámetros, se consideró: $\sigma_h = 1/3$,

$\sigma_a = 2/3$, $r_d = 1/\text{día}$, $\beta_H = 0,1437/\text{día}$, $T_{ct} = 14$ días y un promedio de 4 contactos casuales por día.

Se consideraron diferentes escenarios para evaluar distintas medidas de control. El escenario E1 corresponde al caso de epidemia libre. En el escenario E2 se implementa el rastreo y aislamiento de contactos y el aislamiento de casos. En el escenario E3 se agrega al E2 el cierre de escuelas. Por último, en los escenarios E4 y E5 se le agrega al E3 el cierre del 25 % y el 50 % de los lugares de trabajo, respectivamente. Las escuelas se cierran cuando se ocupa un 35 % de las camas de hospital y se reabren cuando este porcentaje baja al 5 %. A su vez, el porcentaje correspondiente de los lugares de trabajo son cerrados al alcanzar una ocupación de camas del 50 % y reabiertos cuando ésta es menor al 40 %. Se consideró que la población cuenta con 4 camas cada 1000 habitantes.

3.1. RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES

Cuando $\rho_j = 1$ para todo j , la saturación del sistema de salud es prácticamente imposible de evitar. El tiempo de duplicación de la epidemia libre se estimó en 2.12 días, con un tamaño final de la epidemia superior al 99 %. Así, se puede ver que para el modelo desarrollado asumir $\rho_j = 1$ para todo j no es realista.

Para los casos 1 y 2, el tiempo de duplicación en E1 fue de 6.5 días en el caso 1, y de 7.14 para el caso 2. Estos valores están en el rango de los tiempos de duplicación observados [4], [7], [8]. La dinámica de los individuos hospitalizados para cada escenario se muestra en la Fig. 2.

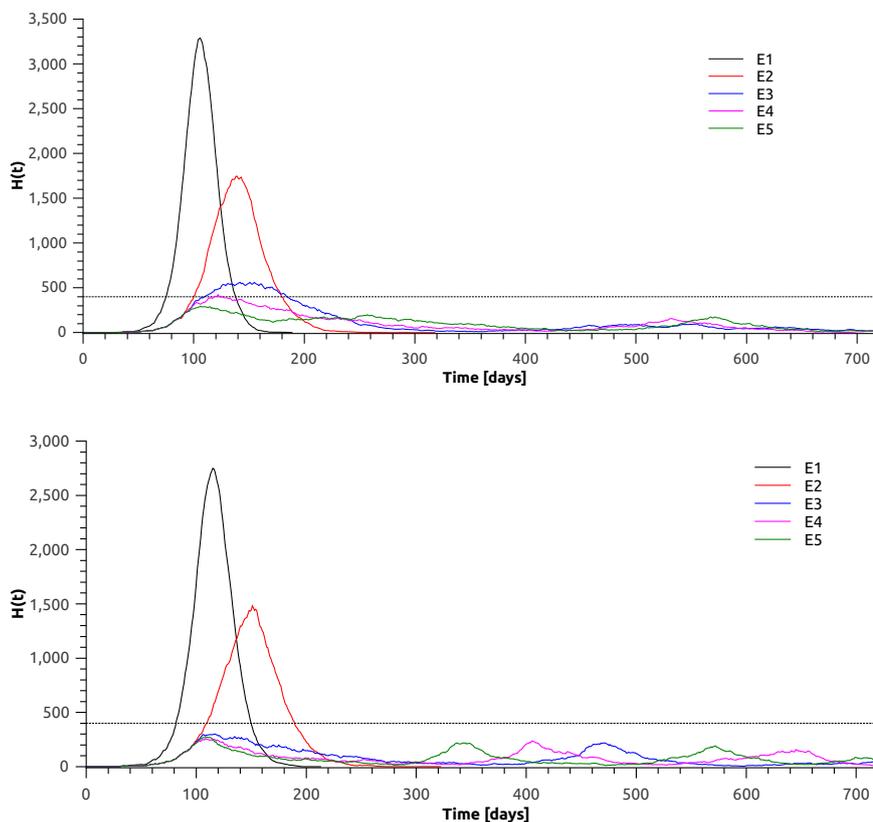


Figura 2: Dinámica de los individuos hospitalizados para cada escenario considerando: $\rho_W = 1/2$ (caso 1 - arriba) y $\rho_W = 1/3$ (caso 2 - abajo). La línea horizontal es la cantidad total de camas.

En el caso 1, aplicar la estrategia de rastreo y aislamiento de contactos y además cerrar las escuelas no es suficiente para evitar un colapso del sistema sanitario. Se necesita también hacer un cierre parcial de los lugares de trabajo. Con un cierre del 25 % de estos, el sistema de salud funcionaría a su máxima capacidad. En estas condiciones, cerrar el 50 % asegura una buena respuesta del sistema de salud. A su vez, el tamaño final de la epidemia disminuye a medida que aumenta el cierre parcial de escuelas y lugares de trabajo. En el escenario E1, este valor es de aproximadamente el 94 %, mientras que disminuye al 78 %, 65 %, 53 %

para los escenarios E2, E3 y E4, respectivamente. Además, para los escenarios E4 y E5 este valor no presenta grandes diferencias.

Una situación completamente diferente ocurre en el caso 2. Si se reduce ρ_W , el tamaño final de la epidemia es menor en todos los escenarios. Un resultado no trivial considerando $\rho_W = 1/3$, es que cerrar solo las escuelas es suficiente para no colapsar el sistema de salud. A su vez, cerrar un 25 % o 50 % de los lugares de trabajo tiene aproximadamente el mismo efecto, dejando en claro que considerar $\rho_W = 1/3$ reduce la importancia de los lugares de trabajo en la dinámica de la infección. En la Fig. 2 (abajo), se puede ver que a medida que la política de control es más agresiva, los nuevos picos se producen antes. El tiempo en el que comienzan los nuevos picos se corresponden con el momento en el cual se reabren las escuelas.

3.2. RESULTADOS PARA OTROS VALORES DE PARÁMETROS.

En el análisis anterior se consideraron los peores escenarios de acuerdo con los datos disponibles. Si la proporción de casos no detectados (σ_a) se reduce a 0,15, cerca del límite inferior informado [6], el rastreo y aislamiento de los contactos es mucho más eficaz y la epidemia prácticamente no tiene lugar. Teniendo en cuenta que se implementó una política de seguimiento de contactos conservadora, este resultado parece poco realista. Por otro lado, si la proporción de hospitalización (σ_h) se reduce solo al 10 % de los casos detectados, también se logra fácilmente la prevención de la saturación del sistema de salud. Incluso en el peor de los casos en el que el riesgo de transmisión es igual en todos los entornos ($\rho_j = 1$ para todo j), el cierre de escuelas es suficiente para evitar la saturación de camas de hospital (considerando $\sigma_a = 0,15$ y $\sigma_h = 0,1$).

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El modelo desarrollado permite simular la dinámica de la infección en un ciudad de tamaño mediano considerando distintos estados de la enfermedad. A su vez, permite evaluar el efecto de aplicar distintas medidas de control como el seguimiento y aislamiento de casos, el cierre de escuelas y de lugares de trabajo.

Este enfoque de modelado tiene algunas ventajas. En primer lugar, las medidas de control modifican el comportamiento individual de la población, en lugar de alterar los parámetros de transmisión de la enfermedad, como sucede en otros modelos (ver por ejemplo [1] [2], [3]). A su vez, las medidas de control no se implementan por periodos fijos de tiempo, sino que estos dependen de la disponibilidad de camas.

A su vez, el modelo puede mejorarse al considerar distribuciones reales de la ocupación en casas y trabajos, como también agregando estructura de edad a la población, dado que es sabido que no todas las edades tienen la misma probabilidad de hospitalización.

REFERENCIAS

- [1] Q. LIN, S. ZHAO, D. GAO, Y. LOU, S. YANG, S.S. MUSA, ET. AL., *A conceptual model for the coronavirus disease 2019 (COVID-19) outbreak in Wuhan, China with individual reaction and governmental action* International Journal of Infectious Diseases, 93 (2020), pp. 211-216.
- [2] M.A. ACUÑA-ZEGARRA, M. SANTANA-CIBRIAN, J.X. VELASCO-HERNANDEZ, *Modeling behavioral change and COVID-19 containment in Mexico: A trade-off between lockdown and compliance*, Mathematical Biosciences, 325 (2020) 108370.
- [3] G. GIORDANO, F. BLANCHINI, R. BRUNO, P. COLANERI, A. DI FILIPPO, A. DI MATTEO, ET. AL., *Modelling the COVID-19 epidemic and implementation of population-wide interventions in Italy*, Nature Medicine, 26 (2020), pp. 855 - 860.
- [4] Q. LI, X. GUAN, P. WU, X. WANG, L. ZHOU, Y. TONG, ET. AL., *Early transmission dynamics in Wuhan, China, of novel coronavirus-infected pneumonia*, New England Journal of Medicine, 382 (2020), 1199-1207.
- [5] H. ZHAO, AND Z. FENG, *Staggered release policies for COVID-19 control: Costs and benefits of relaxing restrictions by age and risk*, Mathematical biosciences, 326 (2020), 108405.
- [6] CENTERS FOR DISEASE CONTROL AND PREVENTION, *COVID-19 Pandemic Planning Scenarios*, <https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/hcp/planning-scenarios.html> (Accedido 22 de agosto, 2020), 2020.
- [7] E. VOLZ, M. BAGUELIN, S. BHATIA ET. AL., *Phylogenetic analysis of SARS-CoV-2*, Imperial College London (15-02-2020), doi: <https://doi.org/10.25561/77169>.
- [8] J.T. WU, K. LEUNG, G.M. LEUNG, *Nowcasting and forecasting the potential domestic and international spread of the 2019-nCoV outbreak originating in Wuhan, China: a modelling study*, The Lancet, 395 (2020), 689-697.