



Artículo original

Propuesta de un modelo SYIR modificado para predecir la cinemática de la epidemia por COVID-19

Proposal for a modified SYIR model to predict the kinematics of the COVID-19 epidemic

Agustina Marconi
Médica, Latinas in Global Health, Miami, EE.UU.


Rafael Zamora, Médico, Sociedad de Medicina Interna General; Gerente de Estrategia Médica, MEDICUS, Ciudad de Buenos Aires, Argentina

Matías Márquez, Ingeniero Químico, Ciudad de Buenos Aires, Argentina

Acceda a este artículo en siicsalud

www.siicsalud.com/experto.php/163607

Recepción: 5/5/2020 - Aprobación: 28/5/2020
 Preedición, www.siicsalud.com: 6/5/2020
 Primera edición, www.siicsalud.com: 13/7/2020
Enviar correspondencia a: Agustina Marconi,
 Latinas in Global Health, 20SW 58th Ave.,
 Miami, EE.UU.
agusmar74@gmail.com

 Especialidades médicas relacionadas, producción bibliográfica y referencias profesionales de los autores.



www.dx.doi.org/10.21840/siic/163607

Abstract

In late 2019, an infection in humans by the SARS-CoV-2 virus was detected for the first time in Wuhan, China. By February, several countries had sustained viral circulation. On March 11, the World Health Organization (WHO) declared a global pandemic. Initially, one of the main concerns regarding the spread of this pathogen was the possible lack of capacity of health systems to absorb the demand for resources in a pandemic situation. At the local level, on March 19 a measure of "social, preventive and mandatory isolation" was established, from March 20 to March 31, 2020, in order to protect public health, which was later extended until March 26 April through DNU 335/2020. MEDICUS is a private medicine company with representation throughout Argentina for 48 years. 85% of its affiliates reside in the Metropolitan Area of Buenos Aires (AMBA), Argentina. The objective of this study is to propose a modified SYIR (Susceptible-Contagious-Infective-Recovered) model, with the purpose of generating a monitoring tool that can anticipate the behavior of the COVID-19 pandemic in the AMBA population of a company prepayment, and the consequences of the measures adopted by the health authorities and their compliance over time. In the case of MEDICUS, for the optimistic scenario, a start of the peak of cases is expected in the first week of June and an end in late November, with a peak in early September; the pessimistic scenario begins the peak in mid-April, reaches its maximum in late May and ends in mid-June. It presents a much larger number of cases, more concentrated in time. The moderate scenario is an intermediate of both. The COVID-19 pandemic is a huge challenge for all health systems in the world, not just for Argentina. In our study, we forecast three possible scenarios for the behavior of the pandemic (optimistic, moderate and pessimistic) that will depend on the characteristics, adherence and persistence of the isolation measures in our country. Given the current dynamics and compliance with these measures, we estimate it possible that the real measure is somewhere between the optimistic and moderate scenarios.

Keywords: COVID-19, deep SYIR model, health systems, pandemic, pandemic behavior

Resumen

A fines del año 2019, se detectó por primera vez en Wuhan, China, una infección en seres humanos por el virus SARS-CoV-2. Para febrero, varios países registraban circulación viral sostenida. El 11 de marzo la Organización Mundial de la Salud (OMS) declaró la pandemia mundial. Inicialmente, una de las principales preocupaciones ante la expansión de este patógeno fue la posible falta de capacidad de los sistemas sanitarios para absorber la demanda de recursos ante una situación de pandemia. En el ámbito local, el 19 de marzo se estableció una medida de "aislamiento social, preventivo y obligatorio", desde el 20 hasta el 31 de marzo de 2020, con el fin de proteger la salud pública, que luego se extendió hasta el 26 de abril mediante el DNU 335/2020. MEDICUS es una empresa de medicina prepaga con representación en toda la Argentina desde hace 48 años. El 85% de sus afiliados reside en el Área Metropolitana de Buenos Aires (AMBA). El objetivo de este trabajo es proponer un modelo SYIR (Susceptible-Contagiado-Infectante-Recuperado) modificado, con el propósito de generar una herramienta de seguimiento que pueda anticipar el comportamiento de la pandemia de COVID-19 en la población del AMBA de una empresa prepaga, y las consecuencias de las medidas adoptadas por las autoridades sanitarias y su cumplimiento a través del tiempo. En el caso de MEDICUS, para el escenario optimista se espera un inicio del pico de casos en la primera semana de junio y una finalización a fines de noviembre, con un máximo a comienzos de septiembre; el escenario pesimista inicia el pico a mediados de abril, llega a su máximo a fines de mayo y lo termina a mediados de junio. Presenta un número mucho mayor de casos, más concentrado en el tiempo. El escenario moderado es un intermedio de ambos. La pandemia de COVID-19 es un enorme desafío para todos los sistemas de salud del mundo, no solo para el argentino. En nuestro estudio, pronosticamos tres escenarios posibles de comportamiento de la pandemia (optimista, moderado y pesimista) que dependerán de las características, la adhesión y la persistencia de las medidas de aislamiento en nuestro país. Por la dinámica actual y el cumplimiento de estas medidas, estimamos posible que la real medida se sitúe en algún punto entre el escenario optimista y el moderado.

Palabras clave: COVID-19, modelo SYIR (susceptible-contagiado-infectante-recuperado), sistemas de salud, pandemia, comportamiento de la pandemia

Introducción

A fines del año 2019, se detectó por primera vez en Wuhan (China), una infección en seres humanos por el coronavirus 2 del síndrome respiratorio agudo grave (SARS-CoV-2, [severe acute respiratory syndrome]).¹ El 30 de enero de 2020, la Organización Mundial de la Salud (OMS) declaró el brote como una "emergencia de salud pública de importancia internacional (ESPII)".² Para febrero, varios países, entre ellos parte de Europa, registraban circulación viral sostenida. El 11 de marzo, la OMS declaró la pandemia mundial.³ Inicialmente, una de las principales preocupaciones ante la expansión de este patógeno fue la posible falta de capacidad de los sistemas sanitarios para absorber la demanda de recursos ante una situación de pandemia.

Surgieron así modelos predictivos del comportamiento de la enfermedad por coronavirus 2019 (COVID-19) según su capacidad infectante (caracterizada por el ritmo reproductivo básico, R_0). A los estados se le presentan dos inconvenientes; primero, cómo reducir el impacto en la salud pública de un brote local de COVID-19 evitando la saturación de los sistemas de salud y, segundo, cómo reducir al máximo el impacto económico de las medidas a implementar que busque morigerar el efecto del virus. Para ambos objetivos, es fundamental contar con modelos epidemiológicos teóricos que permitan predecir el comportamiento de la pandemia con el fin de proveer información fundamental para la toma de decisiones dentro del ámbito de la política pública y de la gestión privada. Por ejemplo, la pandemia de 2009 por H1N1 puso de relieve la importancia del análisis eficaz de los datos de una variedad de parámetros de transmisión, entre ellos el R_0 .⁴

Desde el inicio de la pandemia de COVID-19, la influencia del modelaje epidemiológico para la toma de decisiones quedó fuertemente reflejada en las decisiones de los gobiernos británico y norteamericano de cambiar sus políticas con respecto a la pandemia, luego del informe de marzo de 2020 del *Imperial College*, diseñado por Neil Ferguson.⁴ Dicho modelo describe dos estrategias posibles: la supresión, cuyo objetivo es disminuir el R_0 a menos de 1 eliminando la transmisión humano-humano para reducir el número de casos entre generaciones de infectados, y la mitigación, cuyo objetivo es reducir el impacto en salud durante la epidemia, en lugar de interrumpir la transmisión por completo. Este modelo describió que el distanciamiento social parecería ser la medida más efectiva, y que su ausencia escalaría la proporción de infectados a más del 80% de la población.⁶

En el ámbito local, el 12 de marzo de 2020 el Decreto de Necesidad y Urgencia (DNU) 260/2020 de Argentina, decretó la emergencia sanitaria. En este se suspendían todos los vuelos internacionales de las zonas afectadas, y se establecía el aislamiento obligatorio de quienes hubiesen transitado "zonas afectadas".⁷

El 19 de marzo, a través del Decreto N° 297/20, se estableció una medida de "aislamiento social, preventivo y obligatorio" desde el 20 hasta el 31 de marzo de 2020, con el fin de proteger la salud pública, que luego se postergó hasta el 12 de abril de 2020 mediante el Decreto N° 325/20, modificándose subsecuentemente para minimizar la circulación de personas y evitar la propagación del coronavirus-2.⁸ Finalmente, el aislamiento social, preventivo y obligatorio se extendió hasta el 26 de abril mediante el DNU 335/2020, anunciando luego una

flexibilización progresiva de esta medida.⁹ El Ministerio de Salud de la Nación Argentina presentó, en su sala de situación, proyecciones basadas en posibles escenarios para el total país.¹⁰

MEDICUS es una empresa de medicina prepaga con representación en toda la Argentina desde hace 48 años. Sin embargo, el 85% de los afiliados reside en el Área Metropolitana de Buenos Aires (AMBA).

El objetivo de este trabajo es proponer un modelo SYIR (Susceptible-Contagiado-Infectante-Recuperado) modificado, con el propósito de generar una herramienta de seguimiento que pueda anticipar el comportamiento de la pandemia de COVID-19 en la población del AMBA de una empresa prepaga, y las consecuencias de las medidas adoptadas por las autoridades sanitarias y su cumplimiento a través del tiempo. Anticipar el comportamiento de la pandemia permitiría estimar recursos para enfrentarla.

Definiciones teóricas

-Ritmo Reproductivo Básico (R_0): estima la velocidad con que una enfermedad puede propagarse en una población, caracterizando la cantidad de nuevos infectados que un nuevo infectado produce.^{11,12}

-AMBA: incluye la zona urbana común que conforman la Ciudad Autónoma de Buenos Aires (CABA) y 40 municipios de la Provincia de Buenos Aires: Almirante Brown, Avellaneda, Berazategui, Berisso, Brandsen, Campana, Cañuelas, Ensenada, Escobar, Esteban Echeverría, Exaltación de la Cruz, Ezeiza, Florencio Varela, General Las Heras, General Rodríguez, General San Martín, Hurlingham, Ituzaingó, José C. Paz, La Matanza, Lanús, La Plata, Lomas de Zamora, Luján, Marcos Paz, Malvinas Argentinas, Moreno, Merlo, Morón, Pilar, Presidente Perón, Quilmes, San Fernando, San Isidro, San Miguel, San Vicente, Tigre, Tres de Febrero, Vicente López y Zárate. Recorre una superficie de 13 285 km².

Según el censo de 2010, cuenta con más de 13 000 000 de habitantes, que representan el 37% de la población de la Argentina.¹³

-Costos: se expresa en unidades monetarias teóricas, que no se corresponden con la realidad, sino que muestran proporción fija entre escenarios Piso y Unidad de Cuidados Intensivos (UCI).

Los subgrupos se definen de la siguiente manera:

- Susceptibles (S): personas que todavía no se contagiaron y son vulnerables de ser infectados.
- Contagiados (Y): personas que se contagiaron, pero se encuentran en la fase de incubación y no son infectantes.
- Infectantes (I_{asin}): personas que ya cursaron el período de incubación y son infecciosos, pero asintomáticos.
- Infectantes (I_{sin}): personas que ya cursaron el período de incubación, son infecciosos y sintomáticos.
- Removidos (R_{asin}): personas asintomáticas que ya no están más infectadas y no contagian.
- Removidos (R_{sin}): personas sintomáticas que ya no están más infectadas, pueden haberse curado, presentan inmunidad a la infección o han fallecido.

Por otro lado, se define:

- Importados (Imp): infectantes que llegaron desde el exterior.

Métodos

El presente trabajo modela el efecto de la pandemia sobre la base de consideraciones teóricas, con el obje-

tivo de estimar recursos para una empresa de medicina prepaga cuya población se encuentra, en un 85%, en el AMBA. Se elaboró un modelo del tipo SYIR modificado para coincidir con los datos epidemiológicos recabados desde el surgimiento de la epidemia. Estos modelos permiten simular la fenomenología detrás de la pandemia, estimando de manera determinística su comportamiento a partir de valores epidemiológicos medios.

Suposiciones

El modelo planteado es una aproximación del comportamiento real de la pandemia, que considera las siguientes suposiciones:

- No considera la variación demográfica como consecuencia de nacimientos y muertes por analizarse, debido al corto tiempo en que se corre la simulación (N constante).
- Las muertes debidas a COVID-19 son despreciadas en términos globales (se incluyen dentro de los removidos R, pero no afecta N).
- Población homogéneamente mezclada.
- No se consideran reinfecciones. Los recuperados generan anticuerpos contra el virus o fallecen.
- Se considera el 12 de marzo de 2020 como la fecha en que dejan de entrar casos importados al país.
- Se asumen dos fechas de cambio en el comportamiento del R_0 : la primera define el día en que se decreta el aislamiento social obligatorio (17/03/2020), en el que R_0 se reduce en una fracción, y la segunda fecha (14/05/2020) define un período en el cual R_0 asciende linealmente hasta un R_0 mayor, simulando un relajamiento progresivo de la cuarentena. Luego de la segunda fecha, el R_0 se mantiene constante.

Desarrollo

El modelo tipo SYIR modificado planteado evalúa la evolución de seis subpoblaciones de la población total del grupo analizado; en este caso, AMBA. De esta manera, se plantean las siguientes subpoblaciones: Susceptibles (S), Contagiados (Y), Infectantes sintomáticos (I_{sin}), Infectantes asintomáticos (I_{asin}), Removidos sintomáticos (R_{sin}) y Removidos asintomáticos (R_{asin}).

Se plantea para el modelo la secuencia unidireccional de evolución de la población con respecto a la enfermedad, descrita en la Figura 1.

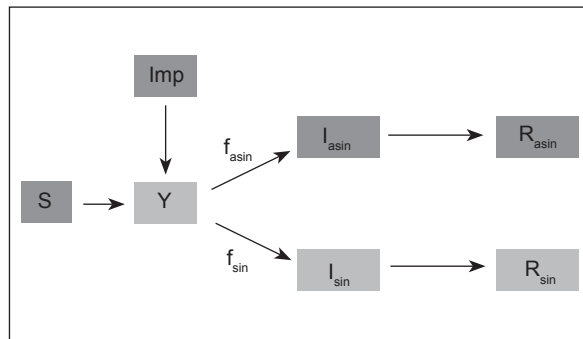


Figura 1. Estructura del modelo SYIR modificado.

Para resolver el modelo matemático epidemiológico propuesto, se plantea el siguiente sistema de ecuaciones diferenciales:

$$\frac{dS}{dt} = -(\beta_{sin}I_{sin} + \beta_{asin}I_{asin})\frac{S}{N} \tag{1}$$

$$\frac{dY}{dt} = (\beta_{sin}I_{sin} + \beta_{asin}I_{asin})\frac{S}{N} - \gamma_i Y + Imp \tag{2}$$

$$\frac{dI_{sin}}{dt} = f_{sin}\gamma_i Y - \gamma_R I_{sin} \tag{3}$$

$$\frac{dI_{asin}}{dt} = f_{asin}\gamma_i Y - \gamma_R I_{asin} \tag{4}$$

$$\frac{dR_{sin}}{dt} = \gamma_R I_{sin} \tag{5}$$

$$\frac{dR_{asin}}{dt} = \gamma_R I_{asin} \tag{6}$$

con $N = S + Y + I_{sin} + I_{asin} + R_{sin} + R_{asin} + \sum Imp$

y donde

$$\beta = \frac{R_0}{t_1}$$

$$\gamma_c = \frac{1}{d_i}$$

$$\gamma_i = \frac{1}{D_i - d_i}$$

y

$t_1 =$ Tiempo medio de generación

$D_i =$ Días totales de infección

$d_i =$ Días de incubación

$t_i =$ Período de infectividad = $D_i - d_i$

$Imp =$ Contagiados importados por día

La ecuación (1) representa el cambio de susceptibles, dado por la cantidad de susceptibles que pasan a ser contagiados. Como puede verse, la tasa de contagios es función de la cantidad de infectantes (sintomáticos y asintomáticos) y de susceptibles. La ecuación (2) representa el cambio de contagiados, dado por la diferencia entre los susceptibles que pasan a ser contagiados y de los contagiados que pasan a ser infectantes (sintomáticos o asintomáticos). La ecuación (3) representa el cambio de infectantes sintomáticos, dado por la diferencia entre los contagiados que pasan a ser infectantes sintomáticos y los infectantes sintomáticos que pasan a ser removidos sintomáticos. La ecuación (4) representa el cambio de infectantes asintomáticos, dado por la diferencia entre los contagiados que pasan a ser infectantes asintomáticos y los infectantes asintomáticos que pasan a ser removidos asintomáticos. Por último, las ecuaciones (5) y (6) representan el cambio de removidos sintomáticos y asintomáticos, respectivamente, dado por los correspondientes infectantes que pasan a ser removidos.

Para resolver el sistema de ecuaciones diferenciales planteado, se utiliza, en primera instancia, el sistema MATLAB® y, una vez conocido el funcionamiento del sistema, Excel aplicando el método de Euler. Tanto en el sistema MATLAB® como en Excel se permite elegir los valores iniciales para S, Y, I y R, y definir el comportamiento de R_0 , simulando el efecto de un distanciamiento o aislamiento social a través del tiempo. También se define la

fracción relativa entre infectantes sintomáticos y asintomáticos. Luego, el resultado es extrapolado a la población de MEDICUS por rango de edad, de manera proporcional a la distribución poblacional de los afiliados. Este modelo no solo permite estimar las distintas subpoblaciones en función del tiempo, sino que posibilita, además, obtener la cantidad de nuevos contagiados, infectantes y removidos que hay por día.

Esta información permite, usando las probabilidades de que los infectantes sean internados en piso o requieran UCI y asumiendo una distribución probabilística de Poisson alrededor de los tiempos medios de estadía en piso, piso para UCI y UCI, predecir la demanda de recursos hospitalarios a lo largo del tiempo (Tabla 1).⁶ Además, por medio de la tasa de mortalidad de los infectantes, es posible estimar la cantidad de fallecidos por día. Finalmente, como parte de este desarrollo, se configura la planilla de Excel creada para resolver el modelo como un tablero que permite evaluar distintos escenarios a partir de la selección de los distintos parámetros por parte del usuario.

Parámetros

Con el fin de obtener mayor correspondencia con la suposición de población homogéneamente mezclada, se define la resolución del modelo solamente para la población del AMBA. Por otro lado, debido a que el 85% de la población afiliada a la prepaga es residente en el AMBA, se sustentó aún más la decisión de utilizar este conglomerado poblacional para las estimaciones (Tabla 2).

Tabla 1. Estimación de la gravedad de los casos y demanda hospitalaria.*

Grupo de Edad (años)	% requiere internación	% requiere UCI	Tasa de mortalidad
0-9	0.10%	5%	0.00%
10-19	0.30%	5%	0.01%
20-29	1.20%	5%	0.03%
30-39	3.20%	5%	0.08%
40-49	4.90%	6%	0.15%
50-59	10.20%	12%	0.60%
60-69	16.60%	27%	2.20%
70-79	24.30%	43%	5.10%
80+	27.30%	71%	9.30%

UCI, Unidad de Cuidados Intensivos.

*Promedio de internación: piso, 8 días; UCI, 16 días (10 en UCI y 6 en piso).⁶

Tabla 2. Parámetros utilizados, según definiciones teóricas para sintomáticos y asintomáticos.

Parámetro	Valor
Población considerada (N)	13 000 000 (población aproximada del AMBA)
R_0 inicial sintomáticos ^{1,2}	2.4
R_0 inicial asintomáticos	2
Tiempo medio de generación (t_1) ³	6.5 días
Período de incubación (d_i) ¹⁶	4 días
Duración de la infección (D_i)	14 días
Tiempo de infectividad (t_i) ⁴	10 días
Día de cambio de R_0 (T_1)	3/18/2020
Día de estabilización de R_0 (T_2)	5/14/2020
Tasa de importación de infectantes (Imp)	150 infectantes/día
Fin de importación de casos	3/12/2020
Fracción de casos asintomáticos/casos totales	0.33
Fracción de afiliados de MEDICUS en el AMBA	0.85

Tabla 3. Población total MEDICUS y porcentaje utilizado.

Grupo de edad	Población total MEDICUS	Población MEDICUS AMBA (85%)
0-9	23 282	19 790
10-19	26 096	22 182
20-29	24 049	20 442
30-39	28 729	24 420
40-49	34 272	29 131
50-59	23 952	20 359
60-69	18 895	16 061
70-79	12 391	10 532
80+	7 116	6 049
Totales	198 782	168 965

La población de MEDICUS y AMBA por grupo de cada 10 años de edad, utilizados para realizar las estimaciones, se observan en la Tabla 3.

De acuerdo con la eficiencia de las medidas de aislamiento social, se definen tres escenarios de estudio: optimista, moderado y pesimista. Dada la complejidad de evaluar R_0 con precisión, se definió, para cada caso, un factor de multiplicación (menor o igual a 1) que indique la reducción del factor R_0 debido a dichas medidas a partir de la fecha de implementación (T_1). El escenario pesimista mantiene un R_0 de 2.4, con un factor de multiplicación de 1; el escenario moderado reduce el R_0 a 1.2, con un factor de multiplicación de 0.50; el escenario optimista reduce el R_0 a 0.8, con un factor de multiplicación de 0.33. Por otro lado, se considera que las medidas descritas en el párrafo anterior sufren un relajamiento progresivo, modelado mediante una rampa lineal de aumento de R_0 hasta llegar a su estabilización. Para esto, se establece un segundo factor (mayor o igual al primero) y una segunda fecha (T_2), y se considera una variación lineal de R_0 entre ambas fechas (T_1 y T_2). La variación de R_0 para los escenarios optimista, moderado y pesimista puede verse en el Anexo 1.

Resultados

La Tabla 4 muestra los resultados por escenarios. Incluye lo proyectado para el AMBA así como los diferentes escenarios para la empresa prepaga. Para la zona del AMBA, se consideran entre 9 220 910 y 12 553 415 de infectados en los escenarios optimista y pesimista, respectivamente, incluyendo sintomáticos y asintomáticos, representado por la cantidad de removidos acumulados (Tabla 4).

En el caso de MEDICUS, para el escenario optimista se espera un inicio del pico de casos en la primera semana de junio y una finalización a fines de noviembre, con un máximo a comienzos de septiembre; este escenario muestra cómo el aplanamiento de la curva no solo disminuye el número de casos, sino que también los concentra en un tiempo mayor. Como contrapartida, el escenario pesimista inicia el pico a mediados de abril, llega a su máximo a fines de mayo y lo termina a mediados de junio. Presenta un número mucho mayor de casos, más concentrado en el tiempo. El escenario moderado es un intermedio de ambos (Tabla 4).

La mayor presión del sistema de salud se mide en la necesidad de internación de estos pacientes. El máximo de afiliados simultáneos internados en piso que tendría MEDICUS a causa de la infección por coronavirus-2 osci-

Tabla 4. Proyección de los escenarios optimista, moderado y pesimista para AMBA y MEDICUS, 2020.

Caso	Optimista (R ₀ 0.8)	Moderado (R ₀ 1.2)	Pesimista (R ₀ 2.4)
Inicio pico AMBA (T _{max} - 2σ)	06/06/2020	09/05/2020	17/04/2020
Fin pico AMBA (T _{max} + 2σ)	25/11/2020	07/08/2020	18/06/2020
Día del máximo de epidemia (T _{max}) AMBA	08/09/2020	30/06/2020	24/05/2020
Máximo de contagiados en AMBA	415 106	1 035 169	1 578 646
Máx. infectantes sintomáticos en AMBA	662 526	1 522 164	2 149 494
Máx. infectantes asintomáticos en AMBA	331 263	761 082	1 074 747
Removidos sintomáticos acumulados en AMBA	6 147 273	7 855 677	8 368 943
Removidos asintomáticos acumulados en AMBA	3 073 637	3 927 839	4 184 472
Máx. nuevos infectantes en un día en AMBA	69 179	172 538	262 916
Máximo de afiliados de MEDICUS de AMBA internados simultáneamente en piso	79	195	292
Fechas	07/09/2020	30/06/2020	25/05/2020
Acumulado de días de internación de afiliados de MEDICUS de AMBA en piso	7047	9004	9592
Máximo de afiliados de MEDICUS de AMBA internados simultáneamente en UCI	19	45	67
Fechas	10/09/2020	02/07/2020	28/05/2020
Acumulado de días de internación de afiliados de MEDICUS de AMBA en UCI	1611	2059	2193
Máximo de afiliados de MEDICUS de AMBA fallecidos en un día	3	8	11
Fechas	07/09/2020	29/06/2020	25/05/2020
Acumulado de afiliados de MEDICUS de AMBA fallecidos	256	327	349

laría entre 79 y 292 (escenarios optimista y pesimista) y en UCI entre 19 y 67; los tiempos de aparición de estos son muy cercanos a los mencionados previamente, tal como se observa en la Tabla 3. Los días acumulados de internación por estos pacientes oscilarían entre 7047 y 9592 en piso, para los escenarios optimista y pesimista, y entre 1611 y 2193 en UCI, respectivamente. Mientras tanto, los fallecimientos estimados debido a la pandemia para la población de la empresa prepaga oscilarían entre 256 y 349, respectivamente. Asimismo, la ponderación de la banda etaria en esta estimación puede observarse en el Anexo 2.

Conclusiones

La pandemia de COVID-19 es un enorme desafío para todos los sistemas de salud del mundo, no solo para el argentino. En nuestro estudio pronosticamos tres escenarios posibles de comportamiento de la pandemia (optimista, moderado y pesimista), que dependerán de las características, la adhesión y la persistencia de las medidas de aislamiento en nuestro país. Por la dinámica actual y el cumplimiento de estas medidas, estimamos posible que la real medida se sitúe en algún punto entre el escenario optimista y el moderado.

Nuestras observaciones predicen para la población de MEDICUS en el AMBA una concentración de casos que se daría entre principios de junio y fin de noviembre para el escenario optimista, entre principios de mayo y principios de agosto para el moderado, y entre mediados de abril y

mediados de junio para el pesimista, con un pico de utilización de camas por COVID-19 de entre 79 y 292 en piso y de entre 19 y 67 en UCI (escenarios optimista y pesimista, respectivamente). En relación con el promedio mensual invernal de utilización de camas de MEDICUS durante 2019, el incremento de camas en piso por COVID-19 representaría 17% más de utilización en días de piso y 22.1% más en UCI para el escenario optimista, así como 64.1% y 83.5% para el escenario pesimista, respectivamente. Estos datos ponen de manifiesto la importancia del aplanamiento de la curva para evitar las graves consecuencias de la saturación del sistema.

Encontramos diferencias con otras estimaciones realizadas a causa de los distintos parámetros asumidos o las diferencias poblacionales existentes. Nuestros escenarios planteados muestran notables similitudes y diferencias con ellas. Las fechas de utilización máxima de insumos para nuestros escenarios ocurren antes que el escenario propuesto en este análisis, respecto de otras propuestas de corte nacional, como la elaborada por la Universidad del Comahue.¹⁴ Esto podría deberse a que nuestro modelo plantea la posibilidad del contagio en asintomáticos, a pesar de plantear también una extensión de tiempo mayor de la cuarentena. En un modelo para la zona del AMBA, realizado por Díaz Resquín y col.,¹⁵ se plantean distintos escenarios de apertura de la cuarentena, con resultados de pico similares a los observados en nuestro trabajo. Dichos autores plantean que por cada 15 días de extensión de la cuarentena, se retrasa en un mes el rebrote de la epidemia, con una necesidad de camas de UCI que puede oscilar entre 2000 y 8000 simultáneas en el caso de liberación absoluta de la cuarentena. Recientemente, un modelo elaborado por el *Institute for Health Metrics and Evaluation* (IHME), con sede en Washington (EE.UU.), realizó una importante proyección de la utilización de los recursos en internación en EE.UU. y proyectó un déficit de un 3.5% para las camas de piso y un 31% para las camas de UCI en el momento pico.¹⁵ Es necesario aclarar que esta estimación se efectuó sobre el déficit de camas estructurales del sistema de salud de ese país, con una importante diferencia entre los estados. Nuestra comparación mencionada con anterioridad, no se basó en la comparación con la infraestructura hospitalaria y su potencial déficit, sino con la utilización del año anterior, ya que nuestro sistema es fragmentado y con escasa integración vertical.

A los fines de la gestión de la pandemia, este mayor consumo en internación puede ser compensado con un descenso en las internaciones electivas evitables (p. ej., algunas cirugías programadas) y la reducción por el impacto del aislamiento en accidentes de tránsito y en otras infecciones virales respiratorias, como la influenza. Nuestro modelo no tuvo como objetivo el uso de camas de UCI con respiradores mecánicos. Por estos motivos, es importante destacar que los modelos de proyección teóricos se desarrollan en escenarios altamente dinámicos. Debemos tener en cuenta esto para poder modificar parámetros y adaptarlos a la evidencia cambiante. Sin embargo, su uso más adecuado y eficiente es para estimar los efectos relativos de las intervenciones realizadas en el control de las epidemias, en lugar de producir pronósticos mediante predicciones cuantitativas precisas. El estudio de la epidemia de COVID-19 tiene la dificultad de ser un fenómeno que sorprendió a las instituciones médicas y científicas del mundo, en el que la definición de los distintos parámetros epidemiológicos varió, y sigue modificándose, con

una frecuencia extremadamente alta, y donde las fidelidades de las estadísticas están bajo tela de juicio. Por otro lado, la COVID-19 permite la aplicación de los modelos epidemiológicos con una población que inicialmente se encuentra completamente susceptible, fenómeno poco frecuente.

Dada la forma en que está armado el modelo, se consideró que era poco fiel aplicarlo a la población completa de la Argentina sin distinción, ya que las heterogeneidades demográficas derivarían en resultados erróneos, sobreestimando los casos en poblaciones reducidas y subestimándolos en las poblaciones grandes. Por otro lado, al aplicar el modelo a Argentina, particularmente al AMBA, era necesario incorporar la afluencia de casos importados en la primera fase de la epidemia, en la que los casos comunitarios son nulos. Esto se resolvió aplicando un término fuente a las ecuaciones diferenciales para representar este fenómeno. La importación de casos fue considerada mientras las fronteras seguían abiertas.

Otro factor observado durante la epidemia, e incluido en el modelo, fue la distinción entre casos sintomáticos y asintomáticos. Esto permitió definir distintos valores de R_0 para cada uno y aplicar la estadística de internaciones solamente a los sintomáticos.

Los modelados propuestos incluyen totales país o grandes regiones. Es necesario extender la propuesta a unidades geográficas menores o a efectores del sistema

de salud con una *capita* poblacional de menor escala, como mutuales, obras sociales y prepagas. El impacto de la densidad poblacional es también un efecto que podría evaluarse, así como el impacto del clima en la evolución de la pandemia.

Limitaciones y propuestas

La suposición de mezcla poblacional homogénea permite resolver un modelo simplificado, en el que se utilizan los valores promedio. Este modelo no permite realizar una estimación de la evolución espacial a lo largo del tiempo; por ejemplo, los casos de geriátricos o instituciones sanitarias con alta tasa de contagios, o la propagación de la enfermedad en el Chaco no podrían ser predichos por el modelo.¹⁶ Por otro lado, el modelo parece no incorporar del todo el concepto de "inmunidad de grupo", ya que no se considera la distribución espacial de la población, sino solamente su evolución en función del tiempo. Sin embargo, el modelo permitiría incorporar ese concepto si es posible parametrizar estos efectos de alguna manera. Por último, se propone como futuros trabajos, para aumentar la robustez del modelo, la validación del modelo con datos estadísticos, tanto de COVID-19 como de otras enfermedades infecciosas. Las propuestas futuras pueden considerar análisis de sensibilidad de los parámetros incorporando variaciones y viendo la resultante que mejor se ajuste a la realidad.

Copyright © Sociedad Iberoamericana de Información Científica (SIIC), 2020
www.siicsalud.com

Los autores no manifiestan conflictos de interés.

Nota de la redacción: los lectores podrán visualizar los anexos en Expertos Invitados en www.siicsalud.com, ingresando en www.siicsalud.com/dato/experto.php/163607

Bibliografía

1. Coronavirus Disease 2019 (COVID-19). Situation Summary [Internet]. Center for Disease Control and Prevention (CDC); Disponible en: <https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/cases-updates/summary.html>
2. Declaración sobre la segunda reunión del Comité de Emergencias del Reglamento Sanitario Internacional (2005) acerca del brote del nuevo coronavirus (2019-nCoV) [Internet]. Organización Mundial de la Salud (OMS). Enero, 2020; Disponible en: [https://www.who.int/es/news-room/detail/30-01-2020-statement-on-the-second-meeting-of-the-international-health-regulations-\(2005\)-emergency-committee-regarding-the-outbreak-of-novel-coronavirus-\(2019-ncov\)](https://www.who.int/es/news-room/detail/30-01-2020-statement-on-the-second-meeting-of-the-international-health-regulations-(2005)-emergency-committee-regarding-the-outbreak-of-novel-coronavirus-(2019-ncov))
3. Alocución de apertura del Director General de la OMS en la rueda de prensa sobre la COVID-19 [Internet]. Organización Mundial de la Salud (OMS). Marzo, 2020; Disponible en: <https://www.who.int/es/dg/speeches/detail/who-director-general-s-opening-remarks-at-the-media-briefing-on-covid-19---11-march-2020>
4. Tuite AR, Greer AL, Whelan M, Winter AL, Lee B, Yan P, et al. Estimated epidemiologic parameters and morbidity associated with pandemic H1N1 influenza. *CMAJ* 182(2):131-136, 2010.
5. Booth W. Coronavirus: Chilling scientific paper upends Trump

and Johnson's responses. Independent. March 2020; Disponible en: <https://www.independent.co.uk/news/science/coronavirus-us-uk-trump-boris-johnson-covid-19-response-science-paper-a9407946.html>

6. Ferguson N, Laydon D, Nedjati-Gilani G, Imai N, Ainslie K, Baguelin M, et. al. Impact of non-pharmaceutical interventions (NPIs) to reduce COVID19 mortality and healthcare demand. Imperial College COVID-19 Response Team [Internet]. 2020 Mar 16; Disponible en: <https://spiral.imperial.ac.uk/handle/10044/1/77482>

7. Boletín Oficial de la República Argentina. Año CXXXVIII Número 34327. 12 de Marzo 2020; Disponible en: <https://www.boletinoficial.gob.ar/suplementos/2020031201NS.pdf>

8. Legislación y Avisos Oficiales. EMERGENCIA SANITARIA. Decisión Administrativa 446/2020. DECAD-2020-446-APN-JGM - Certificado Único Habilitante para Circulación. 1 de Abril 2020; Disponible en: <https://www.boletinoficial.gob.ar/detalleAviso/primera/227337/20200401>

9. Legislación y Avisos Oficiales. ADMINISTRACIÓN PÚBLICA NACIONAL. Decreto 335/2020. DCTO-2020-335-APN-PTE - Decreto N° 50/2019. 4 de Abril 2020; Disponible en: <https://www.boletinoficial.gob.ar/detalleAviso/primera/227452/20200405>

10. Sala de Situación. COVID-2019. Novel Coronavirus 2019. Novedades al 19/03 - SE 12. Ministerio de Salud de la Nación. República Argentina. Marzo 2020; Disponible en: https://drive.google.com/file/d/1HfPBM1ePR-r4sPw_jUH0y7uqbcn1u8pd/view
11. Delamater PL, Street EJ, Leslie TF, Yang Y, Jacobsen KH. Complexity of the basic reproduction number (R0). *Emerg Infect Dis* 25(1):1-4, 2019. <https://dx.doi.org/10.3201/eid2501.171901>.
12. Ridenhour B, Kowalik JM, Shay DK. El número reproductivo básico (R0): consideraciones para su aplicación en la salud pública. *Am J Public Health* 108(6); Dec 2018. PMC6291769
13. Unidad de Proyectos especiales para el Área Metropolitana de Buenos Aires. Ministerio de Gobierno, CABA; Disponible en: <https://www.buenosaires.gob.ar/gobierno/unidades%20de%20proyectos%20especiales%20y%20puerto/que-es-amba>
14. Modelo de proyección de casos esperados COVID-19 en Argentina, 2020. Centro Universitario de estudios en Salud, Economía y Bienestar. Universidad del Comahue. Marzo 2020; Disponible en: <https://www.facebook.com/pg/Prensa-UN-Co-234587559891048/posts/>
15. Díaz Resquin MC, Ascolani J, Díaz JA, Díaz Martirena FH, Peña ML. Noticias de Gestión y Economía de la Salud por Carlos Díaz. Modelación Matemática de la propagación del COVID-19: Área Metropolitana de Buenos Aires (AMBA), Argentina Abril 2020; Disponible en: <https://saludbydiaz.com/2020/04/08/modelacion-matematica-de-la-propagacion-del-covid-19-area-metropolitana-de-buenos-aires-amba/>
16. CORONAVIRUS. Información oficial, recomendaciones y medidas de prevención. Provincia de Chaco Argentina. Informes diarios. Disponible en: <http://chaco.gov.ar/covid19/>

Información relevante

Propuesta de un modelo SYIR modificado para predecir la cinemática de la epidemia por COVID-19

Respecto a la autora

Agustina Marconi. Médica, Magister en Salud Pública. Investigadora en *Latinas in Global Health*. Epidemióloga de Planta Permanente, Área Programática del Hospital Parmenio Piñero, Ciudad de Buenos Aires (2012-2018). Consultora OPS, Remediación del Área Cuenca Matanza Riachuelo, Vigilancia Epidemiológica (2009-2011). Colaboradora: Plan de Contingencia ante Pandemia de Gripe H1N1, Cruz Roja Argentina (2009). Médica Generalista de Planta Permanente, Hospital Piñero, GCBA (2007-2013).

Respecto al artículo

La pandemia por COVID-19 es un enorme desafío para todos los sistemas de salud del mundo, no sólo para el argentino. En nuestro estudio pronosticamos tres escenarios posibles de comportamiento de la pandemia (optimista, moderado y pesimista) que dependerán de las características, adhesión y persistencia de las medidas de aislamiento en nuestro país.

La autora pregunta

El 11 de marzo la Organización Mundial de la Salud (OMS) declaró la pandemia mundial. Inicialmente, una de las principales preocupaciones ante la expansión de este patógeno fue la posible falta de capacidad de los sistemas sanitarios para absorber la demanda de recursos ante una situación de pandemia. La COVID-19 afecta directamente nuestro sistema de salud.

Por la dinámica actual y el cumplimiento de estas medidas, ¿cuál es la estimación posible de la real medida del escenario a tratar?

- A Un escenario optimista.
- B Un escenario moderado.
- C Un escenario pesimista.
- D Entre el escenario optimista y el moderado.
- E Ninguna de las opciones mencionadas.

Corrobore su respuesta: www.siicsalud.com/dato/evaluaciones.php/163607

Palabras clave

COVID-19, modelo SYIR (susceptible-contagiado-infectante-recuperado), sistemas de salud, pandemia, comportamiento de la pandemia

Keywords

COVID-19, deep SYIR model, health systems, pandemic, pandemic behavior

Lista de abreviaturas y siglas

SARS-CoV-2, coronavirus 2 del síndrome respiratorio agudo grave; OMS, Organización Mundial de la Salud; ESPII, emergencia de salud pública de importancia internacional; COVID-19, enfermedad por coronavirus 2019; EDNU, Decreto de Necesidad y Urgencia; AMBA, Área Metropolitana de Buenos Aires; SYIR, Susceptible-Contagiado-Infectante-Recuperado; CABA, Ciudad Autónoma de Buenos Aires; UCI, Unidad de Cuidados Intensivos; IHME, *Institute for Health Metrics and Evaluation*.

Cómo citar

Marconi A, Zamora R, Márquez M. Propuesta de un modelo SYIR modificado para predecir la cinemática de la epidemia por COVID-19 en una empresa de medicina prepaga de Argentina. *Salud i Ciencia* 24(1-2):25-32, May-Jun 2020.

How to cite

Marconi A, Zamora R, Márquez M. Proposal for a modified SYIR model to predict the kinematics of the COVID-19 epidemic. Salud i Ciencia 24(1-2):25-32, May-Jun 2020.

Orientación

Diagnóstico, Epidemiología

Conexiones temáticas

