

COLABORACIÓN ESPECIALRecibido: 20 de mayo de 2020
Aceptado: 3 de agosto de 2020
Publicado: 23 de septiembre de 2020**APROXIMACIÓN MATEMÁTICA DEL MODELO EPIDEMIOLÓGICO SIR
PARA LA COMPRESIÓN DE LAS MEDIDAS DE CONTENCIÓN CONTRA LA COVID-19****Jorge Homero Wilches Visbal (1) y Midian Clara Castillo Pedraza (2)**

(1) Facultad de Ciencias de la Salud. Universidad del Magdalena. Santa Marta. Colombia. ORCID: 0000-0003-3649-5079.

(2) Facultad de Ciencias de la Salud. Universidad del Magdalena. Santa Marta. Colombia. ORCID: 0000-0003-3170-3959.

Los autores declaran que no existe ningún conflicto de interés.

RESUMEN

En diciembre de 2019 un brote de enfermedad respiratoria aguda de origen presumiblemente zoonótico, y cuyo agente infeccioso es un nuevo coronavirus, fue detectado en la ciudad de Wuhan, China. Desde entonces, la enfermedad por el nuevo coronavirus 2019 (Covid-19) se expandió rápidamente a más de 200 países alrededor del mundo. Para amortiguar los efectos devastadores del virus, los Estados adoptaron medidas epidemiológicas de diversa índole, lo que implicó gastos económicos ingentes y la utilización masiva de los medios de comunicación para hacer extensivas las medidas a toda la población. Para la predicción y mitigación de eventos infecciosos, diversos modelos epidemiológicos, como el SIR, SEIR, MSIR y MSEIR, son empleados. Entre ellos, el más utilizado es el modelo SIR, que se basa en el análisis de la transición de los individuos susceptibles a la infección (S) al estado de individuos infectados que infectan (I) y, finalmente, al de recuperados (curados o fallecidos) (R), mediante el uso de ecuaciones diferenciales. El objetivo del presente artículo fue el desarrollo matemático del modelo SIR y su aplicación para predecir el curso de la pandemia por Covid-19 en la ciudad de Santa Marta (Colombia), a fin de comprender la razón que subyacía a varias de las medidas de contención adoptadas por los Estados del mundo en la lucha contra la pandemia.

Palabras clave: Modelo SIR, Medidas de contención, Covid-19, Número básico de reproducción, Santa Marta, Colombia.

ABSTRACT**Mathematical approach of the SIR epidemiological model for the comprehension of the containment measures against the Covid-19**

In December 2019, an acute respiratory disease outbreak from zoonotic origin was detected in the city of Wuhan, China. The outbreak's infectious agent was a type of coronavirus never seen. Thenceforth, the Covid-19 disease has rapidly spread to more than 200 countries around the world. To minimize the devastating effects of the virus, the States have adopted epidemiological measures of various kinds that involved enormous economic expenses and the massive use of the media to explain the measures to the entire population. For the prediction and mitigation of infectious events, various epidemiological models, such as SIR, SEIR, MSIR and MSEIR, are used. Among them, the most widely used is the SIR model, which is based on the analysis of the transition of individuals susceptible to infection (S) to the state of infected individuals that infect (I) and, finally, to that of recovered individuals (cured or deceased) (R), by using differential equations. The objective of this article was the mathematical development of the SIR model and its application to predict the course of the Covid-19 pandemic in the city of Santa Marta (Colombia), in order to understand the reason behind several of the measures of containment adopted by the States of the world in the fight against the pandemic.

Key words: SIR model, Containment measures, Covid-19, Basic reproduction number, Santa Marta, Colombia.

Correspondencia:

Jorge Homero Wilches Visbal
Facultad de Ciencias de la Salud
Universidad del Magdalena
Carrera 32, No. 22-08, Sector San Pedro Alejandrino
Santa Marta, Colombia.
jhwilchev@gmail.com

Cita sugerida: Wilches Visbal JH, Castillo Pedraza MC. Aproximación matemática del modelo epidemiológico SIR para la comprensión de las medidas de contención contra la COVID-19. Rev Esp Salud Pública; 94: 23 de septiembre e202009109

INTRODUCCIÓN

La enfermedad por el nuevo coronavirus (Covid-19) es una infección de las vías respiratorias que se transmite de persona a persona, que fue identificada por primera vez durante un brote ocurrido en Wuhan (China) en diciembre de 2019⁽¹⁾. El SARS-CoV-2, el agente infeccioso que causa la Covid-19⁽²⁾, es un coronavirus tipo β que consta de una cadena de ARN protegida por una envoltura esférica de 60-140 nm de diámetro⁽³⁾. Aunque gran parte de las infecciones causadas por coronavirus son leves, las relacionadas con los coronavirus tipo β como el SARS-CoV-1 (Síndrome Respiratorio Agudo Severo) y el MERS-CoV (Síndrome Respiratorio del Medio Oriente) alcanzaron una tasa de mortalidad del 10% y 37%, respectivamente, en las dos últimas décadas⁽³⁾.

A diferencia de las enfermedades asociadas al MERS-CoV y al SARS-CoV-1, la Covid-19 fue declarada pandemia por la Organización Mundial de la Salud (OMS)^(4,5) una vez que se había extendido a más de 200 países, con un saldo funesto de más de 6.200.000 infectados y 370.000 personas fallecidas alrededor del mundo entre finales de diciembre de 2019 y mayo de 2020. En este periodo, los países más afectados en casos/muertes por millón de habitantes fueron, en su mayoría, países europeos, entre los que destacaron Bélgica, España e Italia. En Latinoamérica, entre los más afectados resultaron Ecuador, Perú, Brasil, México y Chile⁽⁶⁾. En Colombia, durante ese lapso, el número de infectados superó los 23.000 y el de muertos se aproximó a los 800⁽⁷⁾, para una tasa de infectados y de muertos por millón de habitantes de 453 y 15, respectivamente, estando muy por debajo de las mundiales ubicadas en 734 y 45, en ese mismo orden⁽⁶⁾.

La epidemiología es el estudio de la distribución, frecuencia y determinantes de las enfermedades que presentan poblaciones humanas específicas. Su objetivo es el control y vigilancia de las enfermedades⁽⁸⁾. Para ello, la epidemiología usa modelos matemáticos que tratan de pronosticar la magnitud y el comportamiento de las enfermedades a fin de amortiguar sus efectos. Los modelos matemáticos epidemiológicos se dividen en estocásticos y determinísticos. Los estocásticos consideran a los individuos del modelo de manera puntual, mientras los determinísticos tratan a los individuos como un conjunto. Por esta razón, los modelos determinísticos se emplean en poblaciones grandes⁽⁹⁾.

Las enfermedades provocadas por virus son estudiadas por modelos epidemiológicos como el SIR o el SEIR, según la complejidad y singularidad de la epidemia⁽⁹⁾. Las siglas de los modelos están asociadas a las posibles etapas de los individuos en el progreso de la enfermedad. Así, el modelo SIR describe el modo en el que los individuos van transitando de susceptibles (S) a infectados (I) y, finalmente, a recuperados (R), de ahí su nombre⁽¹⁰⁾. El propósito del presente estudio fue deducir matemáticamente las ecuaciones del modelo SIR, aplicarlas para simular el recorrido de la pandemia por Covid-19 en la ciudad colombiana de Santa Marta y reflexionar acerca de cómo los factores de control epidemiológicos presentes en las ecuaciones son claves para comprender y explicar las medidas de contención empleadas en la lucha contra la Covid-19.

MODELO EPIDEMIOLÓGICO SIR

El modelo SIR, aplicado en varios tipos de pandemias, objetiva estimar el número de individuos susceptibles a infectarse (S), el número

de individuos infectados capaces de infectar (I) y el número de individuos recuperados (que se curaron o fallecieron) (R)^(10,11,12,13).

El número de individuos susceptibles a infectarse (dS) en el tiempo de observación (dt) , viene dado por la ecuación 1:

$$\frac{dS}{dt} = -\beta C \frac{I}{N} S$$

Donde β es la tasa temporal de probabilidad de un sujeto de llegar a infectarse, C es el número de contactos del sujeto, $\frac{I}{N}$ es la probabilidad de que algún contacto esté infectado, N es el universo de individuos y S el número total de individuos susceptibles de infectarse.

La probabilidad de que un sujeto llegue a ser infectado por otro (βdt) depende de la naturaleza del agente transmisor y del tiempo de contacto con el sujeto infectado. Entre tanto, $\beta dt C \frac{I}{N}$ indica la probabilidad de infectarse que tiene cada sujeto susceptible de contagio. El signo menos (-) indica que la cantidad de individuos susceptibles disminuye con el tiempo, pues a medida que se infectan abandonan el grupo S e ingresan al grupo I.

El número de individuos infectados (dI) en el tiempo de observación (dt) se expresa mediante la ecuación 2:

$$\frac{dI}{dt} = +\beta C \frac{I}{N} S - \frac{dR}{dt}$$

Donde $\frac{dR}{dt}$ es la cantidad de personas que en el tiempo de observación se están recuperando. El signo más (+) indica que, con el tiempo, los individuos se van infectando y, por lo tanto, engrosan el grupo de infectados. Como en el tiempo de observación, es posible que algunos de los individuos se hayan recuperado, por lo que estos dejarán de pertenecer al grupo I para

engrosar el grupo R, lo que se traduce en una substracción a la cantidad de infectados.

El número de recuperados (dR) en el tiempo de observación se puede modelar, de manera simple, mediante la ecuación 3:

$$\frac{dR}{dt} = vI$$

Donde v es la tasa temporal de recuperación de un sujeto infectado, o sea, $v dt$ es la probabilidad de recuperación, en el tiempo dt, de un sujeto que estaba infectado.

La imprecisión de la ecuación 3 radica en que se le está dando la misma probabilidad de recuperación a todos los infectados, independiente del tiempo que llevan en esa condición. Es decir, se están sacando aleatoriamente a individuos del grupo I sin importar si llevan uno, diez, o cien días infectados.

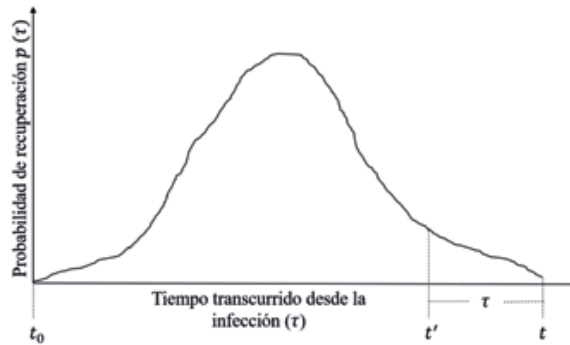
Para corregir la ecuación 3 se emplea una distribución de probabilidad de recuperación de los infectados, como se observa en la [figura 1](#).

Por tanto, el número de individuos recuperados [dR(t)], en el tiempo de observación (dt), viene expresado por la ecuación 4:

$$\frac{dR}{dt} = \int_0^t p(\tau) i(t') dt'$$

Donde $p(\tau)$ es la probabilidad de recuperación durante el tiempo transcurrido (τ), desde el tiempo en que un sujeto cualquiera se infectó (t') hasta el tiempo presente (t), es decir, $\tau = t - t'$, mientras que $i(t')$ es la cantidad de individuos infectados en un tiempo de infección (t'), que se halla entre el tiempo de inicio de la infección ($t=0$) y el tiempo presente (t). La integral indica la suma de todos los individuos que se han venido recuperando desde el inicio del evento

Figura 1
Distribución de probabilidad de recuperación en función del tiempo transcurrido desde el contagio.



infeccioso hasta el tiempo presente. Si $\tau \rightarrow 0$, es decir, cuando la ventana de observación es muy corta, entonces la ecuación 4 se aproxima a la ecuación 3.

Supóngase que el primer infectado de una epidemia cualquiera se reportó el 13/01/2020 y el tiempo presente (fecha del análisis) fue el 20/02/2020. En tal caso, una $p(\tau=3)$ sería la probabilidad de recuperación, a tiempo presente, de un sujeto que se infectó hace 3 días (17/01/2020), e $i(t')$ sería la cantidad de infectados que había hace tres días. En los modelos SIR, por simplicidad, se suele trabajar con la ecuación 3.

Haciendo un cambio de variables, $t = \frac{1}{\beta C} u$, e introduciéndolo en las ecuaciones 1 y 2, se tendría que (ecuación 5):

$$\frac{dS}{du} = -\frac{I}{N}S$$

Y (ecuación 6):

$$\frac{dI}{du} = \left(\frac{S}{N} - \frac{\nu}{\beta C}\right)I$$

A partir de la ecuación 5 se deduce que el número de individuos susceptibles va disminuyendo conforme se propaga la enfermedad. Por otra parte, de la ecuación 6 se infiere que el comportamiento de los infectados dependerá del signo del factor entre paréntesis, de modo que una situación epidémica controlada será aquella donde $\frac{dI}{du} < 0$, lo cual se consigue siempre que $\frac{\nu}{\beta C} > \frac{S}{N}$ en la ecuación 6.

El número básico de reproducción (R_0) es un indicador relevante en salud pública porque expresa la potencia de contagio o capacidad de transmisión de una infección, en función del comportamiento humano y las características biológicas del agente infeccioso. Por este motivo, es habitualmente empleado para estudiar la dinámica de las enfermedades infecciosas⁽¹⁴⁾. Formalmente se define como el número promedio de individuos que se infectan a partir de un infectado en las condiciones “iniciales” de una epidemia, cuando toda la población es susceptible (cero inmunidad de la población y cero medidas de mitigación)^(9,15). Matemáticamente viene dado por la ecuación 7:

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

De esta manera, R_0 se interpreta como cuántas tantas veces mayor o menor es la velocidad de transmisión de la infección, con respecto a la de recuperación, en el momento en que comenzó la epidemia. Por ejemplo, si el primer sujeto que desarrolla la infección, la transmite a otras tres, se dirá que el R_0 es igual a 3. En general, cuando $R_0 > 1$ se propagará la infección, mientras que cuando $R_0 < 1$ la infección desaparecerá rápidamente⁽¹⁵⁾. Por tanto, cuanto mayor es el valor del R_0 más rápidamente progresará la epidemia.

En una epidemia producida por un agente infeccioso completamente nuevo, cuanto antes se realicen las mediciones, más probable es que el R_0 sea el verdadero, suponiendo que los datos hayan sido correctamente registrados. Por esta razón, es más conveniente referirse a la transmisibilidad del agente infeccioso en el momento en que se mide, es decir, el número efectivo de reproducción (R_e) se define como la cantidad de individuos susceptibles que pueden llegar a ser infectados por un individuo en un momento específico cuando toda la población no es susceptible^(15,16). Matemáticamente se expresa como la ecuación 8⁽¹³⁾:

$$R_e(t) = \frac{\beta C S}{\nu N}$$

Por tanto, R_e está influenciado por la fracción de susceptibles, la velocidad de recuperación (o muerte) de los individuos infectados, la cantidad de contactos de los infectados y la velocidad de transmisión de la infección en el instante t ⁽¹⁵⁾.

Sustituyendo la ecuación 8 en la ecuación 6 se tiene que (ecuación 9):

$$\frac{dI}{du} = \frac{S}{N} \left(1 - \frac{1}{R_e} \right) I$$

De modo que, a partir de la ecuación 9 se puede afirmar que una epidemia estará controlada cuando $R_e < 1$, dado que $\frac{dI}{du} < 0$ y S son siempre menores que N ⁽⁹⁾. En otras palabras, cuando $R_e < 1$, la velocidad de recuperación de los infectados es mayor que la velocidad de transmisión de la infección y la epidemia tenderá a desaparecer. Por el contrario, cuando $R_e > 1$, puesto que $\frac{dI}{du} > 0$, la velocidad de recuperación de los infectados es menor que la velocidad de transmisión de la infección: la epidemia tenderá a continuar⁽⁹⁾.

En consecuencia, para controlar una epidemia deben disminuir β , C y S y aumentar ν ⁽¹³⁾. La vacuna, otro factor de control epidemiológico, opera disminuyendo el número de susceptibles⁽¹⁰⁾.

EJEMPLIFICACIÓN DEL MODELO SIR DE LA PANDEMIA POR COVID-19 EN UNA CIUDAD COLOMBIANA

La estimación de la propagación de la pandemia por Covid-19 en la ciudad de Santa Marta (Colombia) se hace a partir de dos modelos SIR con parámetros y condiciones iniciales distintas. Para tanto, lo primero es resolver las ecuaciones 1, 2 y 3, de modo que el número de susceptibles, infectados y recuperados para cada tiempo de observación t se calculan como (ecuaciones 10, 11 y 12):

$$S_{t+1} = S_t - \beta C \frac{S_t}{N} I_t dt$$

$$I_{t+1} = I_t + \left(\beta C \frac{I_t}{N} S_t - \nu I_t \right) dt$$

$$R_{t+1} = R_t + \nu I_t dt$$

Se refleja $t=[0,1,2,3,\dots,n]$, donde n es el tiempo máximo transcurrido desde el inicio de la pandemia. En general, el tiempo y el intervalo del tiempo en que se reportan los casos viene dado en días, por lo que, en ese caso $dt=1$ día.

– MODELO A

Las condiciones iniciales para el modelo A se establecieron en $I_{t=0}=2/N$, $S_{t=0}=1-I$, $R_{t=0}=0$ y $N=479.853^{(17)}$, en consonancia con los datos reportados por el Instituto Nacional de Salud (INS) de Colombia⁽¹⁸⁾ para el periodo entre el 20 de marzo y el 30 de mayo de 2020. Los parámetros del modelo fueron ajustados manualmente hasta que los casos (infectados más recuperados) estimados se aproximaran a los casos reportados. Esto se realizó para tres valores distintos de R_e , como se muestra en la figura 2.

El error absoluto medio (EAM) entre la curva de los casos estimados de $R_e=3,5$, $R_e=2,9$ y $R_e=2,0$, así como la de los reportados fue de

106, 58 y 107, respectivamente. En los últimos tres días del reporte, el EAM para la curva de $R_e=2,9$ fue de 13, aproximadamente.

De la figura 2 se infiere que cuanto mayor valor posee el R_e , más rápidamente se incrementa la cantidad de casos estimados en el tiempo. Como al inicio de la pandemia prácticamente toda la población es susceptible de infectarse, el incremento en el R_e obedece fundamentalmente a valores de R_0 y/o C más altos.

La curva de casos estimados con $R_e=2,9$ presenta una mejor concordancia con la de los casos reportados, por lo cual se tomará para realizar la predicción. Los parámetros del modelo SIR asumidos para modelar esta curva fueron $\beta=0,06$, $C=1,5$ y $\nu=0,021$.

La proyección del número de susceptibles, infectados y recuperados desde el inicio de la pandemia, del 20 de marzo de 2020 hasta el 1 de enero de 2022, se muestra en la figura 3. Se tomó un periodo de observación lo suficientemente

Figura 2
Casos reportados y estimados para la pandemia por Covid-19 en Santa Marta, Colombia, para distintos valores de R_e .

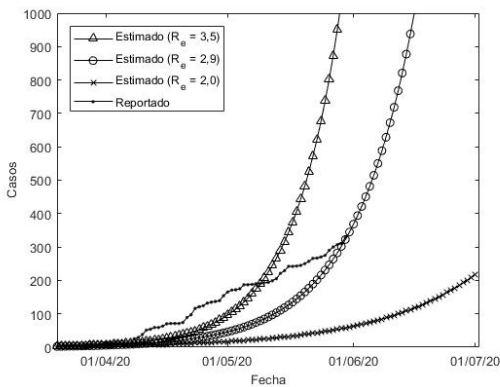
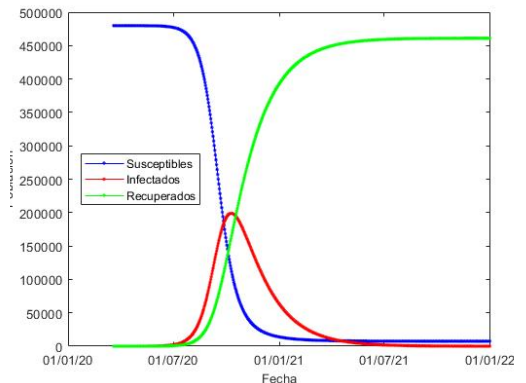


Figura 3
Curva de la cantidad de susceptibles, infectados y recuperados estimados para la pandemia por Covid-19 en Santa Marta, Colombia, para un $R_e=2,9$ entre el 20 de marzo de 2020 y el 1 de enero de 2022.



extenso a fin de visualizar completamente el comportamiento de la pandemia.

De acuerdo con la **figura 3**, la cantidad máxima de infectados simultáneamente correspondería a casi el 42% de la población total y se registraría el 9 de octubre de 2020. Por otro lado, cerca del 98,5% de la población llegaría a infectarse y poco más del 96% se recuperarían. En este modelo se supuso que los recuperados no volverán a infectarse, por lo que la curva de susceptibles es siempre decreciente en el tiempo.

En la **figura 4** se visualiza la cantidad de infectados y recuperados diarios para el periodo comprendido entre el 20 de marzo de 2020 y el 1 de enero de 2022.

A partir de la **figura 4** se establece que el número máximo de infectados diarios será de 7.051 el día 16 de septiembre de 2020. A partir del 9 de octubre de 2020 la cantidad de recuperados comenzará a ser mayor que la de infectados y la pandemia comenzará a declinar.

– MODELO B

El modelo B para simular el progreso de la pandemia en Santa Marta fue elaborado suponiendo un margen de error al inicio de la pandemia tal que el número de infectados y recuperados en ese momento fuera de $I_{t=0}=14/N$ y $R_{t=0}=7/N$, como si la pandemia hubiese surgido a principios de febrero de 2020. El propósito de esta suposición inicial fue conseguir un mejor ajuste a los datos, como se observa en la **figura 5**. En efecto, el EAM para las curvas de $R_e=2,5$, $R_e=1,9$ y $R_e=1,5$ fue de 125, 26 y 71, respectivamente. En los últimos tres días del reporte, el EAM para la curva de $R_e=1,9$ fue de 5, aproximadamente.

En la **figura 5**, se observa que cuanto más alto es el valor del R_e , mayor pendiente de la curva y, por tanto, mayor cantidad de casos reportados. Dado que la curva de casos estimados con $R_e=1,9$ se ajusta mejor a los casos reportados, la cantidad de susceptibles, infectados y recuperados a lo largo del tiempo, presentada

Figura 4
Curva de la cantidad diaria de infectados y recuperados estimados para la pandemia por Covid-19 en Santa Marta, Colombia, para un $R_e=2,9$ entre el 20 de marzo de 2020 y el 1 de enero de 2022.

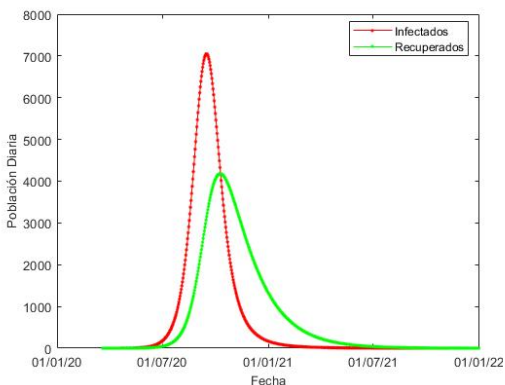
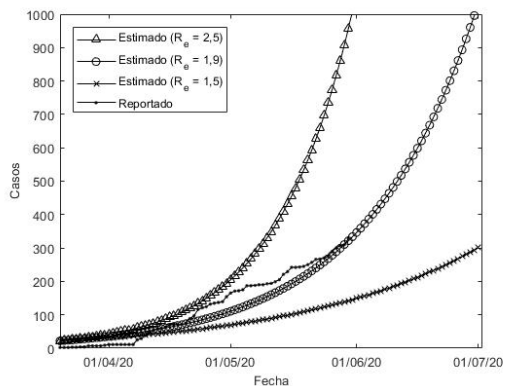


Figura 5
Casos reportados y estimados para la pandemia por COVID-19 en Santa Marta, Colombia, para distintos valores de R_e .



en la **figura 6**, se obtiene a partir de los datos extraídos de ésta. Los parámetros de este modelo fueron $\beta=0,0486$, $C=1,275$ y $v=0,025$.

A partir de la **figura 6** se extrae que la cantidad máxima de infectados a la vez correspondería al 23% de la población total, y se registraría el 10 de enero de 2021. Aproximadamente el 88% de la población se infectaría y poco más del 89% se recuperaría. Esto significa una reducción cercana al 50% de los infectados en comparación con el modelo A. Así mismo, la proporción de susceptibles y recuperados total es menor respecto al modelo A, por cuanto menos individuos se contagiaron en el modelo B. Esto se explica por el hecho de que R_e del modelo B es menor al del modelo A, o sea, la curva es más plana en el B que en el A, lo que se verifica al inspeccionar visualmente las **figuras 2 y 5**. Como el aplanamiento es mayor en el B, el pico máximo de infectados se desplaza hacia el futuro, permitiendo una distribución más homogénea a lo largo del tiempo,

resultando en un mejor control de la pandemia. Esto también contribuye a que, si una vacuna apareciera, muchos susceptibles se tornarían inmunes antes de que se alcanzase el pico de la infección.

La cantidad diaria de individuos infectados y susceptibles, en consecuencia, también sería más baja, comparada con las del modelo A, como se observa en la **figura 7**.

El número máximo de infectados diarios en este modelo sería de 3.386, ocurriendo el 13 de diciembre de 2020. A partir del 10 de enero de 2020 la cantidad de recuperados diarios superaría a la de infectados y la pandemia estaría controlada.

Finalmente, de entre los dos modelos el más alentador es el B, por cuanto se relaciona con una situación epidemiológica más controlable. Sin embargo, será el comportamiento de los individuos, quien defina el curso real de la pandemia en la ciudad.

Figura 6

Curva de la cantidad de susceptibles, infectados y recuperados estimados para la pandemia por Covid-19 en Santa Marta, Colombia, para un $R_e=1,9$ entre el 20 de marzo de 2020 y el 1 de enero de 2022.

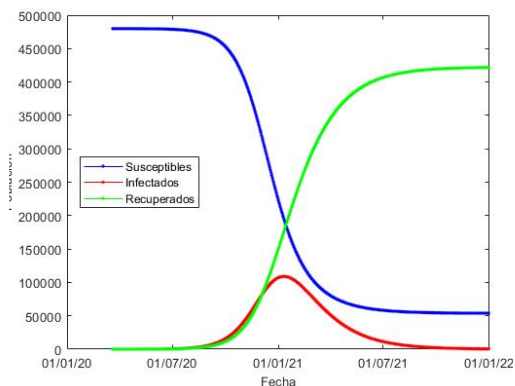
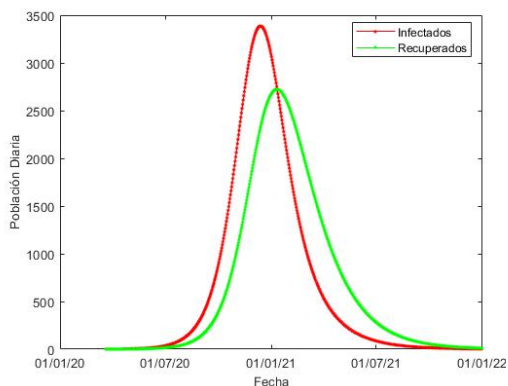


Figura 7

Curva de la cantidad diaria de infectados y recuperados estimados para la pandemia por Covid-19 en Santa Marta, Colombia, para un $R_e=1,9$ entre el 20 de marzo de 2020 y el 1 de enero de 2022.



RELACIÓN ENTRE EL MODELO SIR Y LAS MEDIDAS DE CONTENCIÓN CONTRA LA COVID-19

Después de la demostración matemática y ejemplificaciones del modelo SIR, se pueden explicar y comprender las recomendaciones que han sido adoptadas por las naciones afectadas para contener los efectos adversos de esta pandemia:

i) Cuarentena o distanciamiento social: objetiva disminuir el número de contactos de los individuos mediante el confinamiento, lo cual se traduce en una reducción del valor de C . El distanciamiento social requiere de la toma de consciencia acerca de la gravedad de la infección, por lo que las campañas pedagógicas en distintos medios de comunicación ayudan a promover el “quedarse en casa”. En consecuencia, moldear el comportamiento humano durante la pandemia⁽¹⁹⁾ contribuye a disminuir el valor de C .

ii) Técnicas diarias de higiene: implican la descontaminación de manos, estructuras, superficies y aerosoles por medio del uso de agentes químicos (por ejemplo, alcohol mayor de 70°) o físicos (por ejemplo, luz ultravioleta o solar)^(3,20,21,22), con la pretensión de inactivar el SARS-CoV-2. Esta medida se refleja en la reducción del valor de β .

iii) Elementos de protección personal: se refiere al conjunto de elementos de protección individual (mascarillas, protectores faciales de plástico, overol o mono protector tipo hazmat, guantes, gafas de seguridad, etc.) que actúan como barrera frente a la propagación del coronavirus, con la consecuente disminución del valor de β . Se aconseja usar mascarillas N95 o FFP2 para el personal de salud, y quirúrgicas para el resto de la población^(23,24). Las mascarillas deben ser

usadas por todos los individuos, en especial los infectados⁽¹²⁾.

iv) Distanciamiento físico: es el margen espacial que debe existir entre un sujeto infectado y uno susceptible para evitar la propagación del coronavirus. El distanciamiento físico tiene como propósito reducir el valor de β . Se recomienda un distanciamiento de 1,5 a 2 metros entre los individuos⁽²³⁾. No obstante, un distanciamiento físico igual o superior a 10 m sería aconsejable debido al efecto aerosol⁽¹²⁾.

v) Tratamientos médicos: es la sinergia de abordajes clínicos y medicamentos (por ejemplo, antivirales) que pretenden erradicar el SARS-CoV-2 de los individuos portadores. Con esta medida se busca aumentar el valor de ν y, así, reducir el R_e ⁽¹¹⁾.

vi) Vacuna: se propone reducir el número de individuos susceptibles a infectarse con SARS-CoV-2. Así, la vacuna actúa disminuyendo el valor de R_e . De momento, no existe vacuna contra el SARS-CoV-2.

De este modo, queda claro por qué los profesionales de la salud son más propensos a infectarse: permanecen en contacto o a poca distancia de personas potencialmente infectadas, no siempre cuentan con los elementos de protección personal, desconocen los tratamientos efectivos contra la enfermedad, no cuentan con una vacuna por su inexistencia hasta el momento, y no pueden guardar distancia social o física debido a la naturaleza del oficio, entre otros. Especial preocupación merecen los odontólogos, ya que en su ejercicio profesional se ven obligados a mantener una gran proximidad con la piel, la mucosa y los fluidos corporales (sangre y saliva) de los pacientes. Además, el peligro de contaminarse con los aerosoles generados por las máquinas rotativas es alto⁽²³⁾.

CONCLUSIÓN

La Covid-19, única pandemia de coronavirus registrada en la historia de la humanidad, ha dejado un saldo funesto de contagiados y muertos a escala global a lo largo de los últimos cinco meses. La epidemiología es una ciencia de suma relevancia para el pronóstico y mitigación de los efectos infecciosos, entre ellos el ocasionado por la actual pandemia. El modelo epidemiológico SIR es un abordaje apropiado para comprender los mecanismos de lucha contra la pandemia. El modelo SIR fue usado para predecir el comportamiento de la pandemia en la ciudad de Santa Marta (Colombia) a partir de dos conjuntos de parámetros y condicionales iniciales diferentes. Los resultados mostraron que el modelo B garantiza una menor cantidad de infectados totales y diarios, relacionados con una distribución de infectados más homogénea, con lo cual la probabilidad de colapso hospitalario es menor. Una perspectiva futura de este trabajo sería considerar la contribución explícita de los fallecidos dentro del modelo. Por último, a través de las ecuaciones del modelo SIR y su corroboración en el ejemplo citado se puede explicar por qué la cuarentena, el distanciamiento físico y la búsqueda de tratamientos efectivos y vacunas han recibido toda la atención mediática y han focalizado esfuerzos económicos ingentes por parte de todos los países del mundo.

BIBLIOGRAFÍA

1. Guan WJ, Ni ZY, Hu Y, Liang WH, Ou CQ, He JX et al. Clinical Characteristics of Coronavirus Disease 2019 in China. *N Engl J Med* [Internet]. 2020; Disponible en: <https://www.nejm.org/doi/full/10.1056/NEJMoa2002032>.
2. Van Doremalen N, Bushmaker T, Morris DH, Holbrook MG, Gamble A, Williamson BN et al. Aerosol and Surface Stability of SARS-CoV-2 as Compared with SARS-CoV-1 [Internet]. *The New England journal of medicine*. 2020. p. 1-4. Disponible en: <https://www.nejm.org/doi/full/10.1056/NEJMc2004973>.
3. Fernandez D, Alonso LM, Fernández JA, Ordás B MS. Todo lo que necesitas saber del Coronavirus. *Tiempos enfermería y salud* [Internet]. 2019;2(7):1-10. Disponible en: <https://tiemposdeenfermeriaysalud.es/journal/article/view/73/60>.
4. Organización Mundial de la Salud. La OMS caracteriza a la Covid-19 como una pandemia. 2020; Disponible en: https://www.paho.org/hq/index.php?option=com_content&view=article&id=15756:who-characterizes-Covid-19-as-a-pandemic&Itemid=1926&lang=es.
5. Pulido S. ¿Cuál es la diferencia entre brote, epidemia y pandemia? [Internet]. *Gaceta Médica*. 2020 [citado 8 de mayo de 2020]. Disponible en: <https://gacetamedica.com/investigacion/cual-es-la-diferencia-entre-brote-epidemia-y-pandemia/>.
6. Worldometers. Covid-19 Coronavirus Pandemic [Internet]. 2019 [citado 27 de mayo de 2020]. Disponible en: <https://www.worldometers.info/coronavirus/>.
7. Ministerio de Salud de Colombia. Reporte Mundial Covid-19 [Internet]. 2020 [citado 27 de mayo de 2020]. Disponible en: <https://twitter.com/MinSaludCol/status/1265415303078567937>.
8. Organización Mundial de la Salud. Epidemiología. 2020; Disponible en: <https://www.who.int/topics/epidemiology/es/>.
9. Manrique Abril FG, Agudelo Calderón CA, González Chordá VM, Gutiérrez Lesmes O, Téllez Piñerez CF, Herrera Amaya G. Modelo SIR de la pandemia de Covid-19 en Colombia. *Rev Salud Pública* [Internet]. 2020;22(1):1-9. Disponible en: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/revsaludpublica/article/view/85977>.
10. Van den Driessche P. Reproduction numbers of infectious disease models. *Infect Dis Model* [Internet]. 2017;2(3):288-303. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6002118/>.

11. Gerber W. Minicurso de Epidemiología [Internet]. Universidad Austral de Chile. 2012 [citado 9 de mayo de 2020]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=zUYwDv2wDfl&t=13s>.
12. Gerber W. Modelamiento Básico del Covid-19 [Internet]. Universidad Austral de Chile. 2020 [citado 9 de mayo de 2020]. Disponible en: <https://druid.gforecast.net/pages/druid-show.php?db=gforecast&lang=2&person=0&gen=storyboard&id=55>.
13. Ridenhour B, Kowalik JM, Shay DK. El número reproductivo básico (R0): Consideraciones para su aplicación en la salud pública. *Am J Public Health* [Internet]. 2018;108(1):S455-65. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6291769/>.
14. Delamater PL, Street EJ, Leslie TF, Yang YT, Jacobsen KH. Complexity of the basic reproduction number (R0). *Emerg Infect Dis* [Internet]. 2019;25(1):1-4. Disponible en: https://wwwnc.cdc.gov/eid/article/25/1/17-1901_article.
15. Aronson JK, Brassey J, Mahtani KR. “When will it be over?”: An introduction to viral reproduction numbers, R0 and Re [Internet]. Centre for Evidence-Based Medicine, Nuffield Department of Primary Care Health Sciences, University of Oxford. 2020. p. 1-9. Disponible en: https://www.cebm.net/wp-content/uploads/2020/04/“When-will-it-be-over”_-An-introduction-to-viral-reproduction-numbers-1.pdf.
16. Nishiura H, Chowell G. The effective reproduction number as a prelude to statistical estimation of time-dependent epidemic trends. En: *Mathematical and Statistical Estimation Approaches in Epidemiology*. 2009. p. 103-21.
17. Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). Resultados Población, Censo Nacional de y Vivienda 2018, Santa Marta Magdalena [Internet]. 2019 [citado 31 de mayo de 2020]. p. 1-46. Disponible en: <https://www.dane.gov.co/files/censo2018/informacion-tecnica/presentaciones-territorio/191004-CNPV-presentacion-Magdalena.pdf>.
18. Instituto Nacional de Salud (INS). Reporte Diario Coronavirus Colombia [Internet]. 2020 [citado 31 de mayo de 2020]. Disponible en: <https://www.ins.gov.co/Noticias/Paginas/Coronavirus.aspx>.
19. Bavel JJ Van, Baicker K, Boggio PS, Capraro V, Cichocka A, Cikara M et al. Using social and behavioural science to support Covid-19 pandemic response. *Nat Hum Behav* [Internet]. 30 de mayo de 2020;4(5):460-71. Disponible en: <https://www.nature.com/articles/s41562-020-0884-z>.
20. Theory Division CCLRI, Card KJ, Crozier D, Dhawan A, Dinh M, Dolson E et al. UV Sterilization of Personal Protective Equipment with Idle Laboratory Biosafety Cabinets During the Covid-19 Pandemic. *medRxiv* [Internet]. 2020;2020.03.25.20043489. Disponible en: <https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2020.03.25.20043489v1%0Ainternal-pdf://0.0.23.4/2020.03.25.html>.
21. Kampf G, Todt D, Pfaender S, Steinmann E. Persistence of coronaviruses on inanimate surfaces and their inactivation with biocidal agents. *J Hosp Infect* [Internet]. 2020;104(3):246-51. Disponible en: [https://www.journalofhospitalinfection.com/article/S0195-6701\(20\)30046-3/fulltext](https://www.journalofhospitalinfection.com/article/S0195-6701(20)30046-3/fulltext).
22. Ratnesar-Shumate S, Williams G, Green B, Krause M, Holland B, Wood S et al. Simulated Sunlight Rapidly Inactivates SARS-CoV-2 on Surfaces. *J Infect Dis* [Internet]. 20 de mayo de 2020;jiaa(274):1-25. Disponible en: <https://academic.oup.com/jid/advance-article/doi/10.1093/infdis/jiaa274/5841129>.
23. Martins-Filho PR, Gois-Santos VT, Tavares CSS, Melo EGM de, Nascimento-Júnior EM do, Santos VS. Recommendations for a safety dental care management during SARS-CoV-2 pandemic. *Rev Panam Salud Pública* [Internet]. 2017;44(e51):1-7. Disponible en: <https://iris.paho.org/handle/10665.2/51999>.
24. Salas CA. Consideraciones para la Atención de Urgencia Odontológica y Medidas Preventivas para Covid-19 (SARS-CoV 2) TT - Considerations for Emergency Dental Care and Preventive Measures for Covid-19 (SARS-CoV 2). *Int J Odontostomatol* [Internet]. 2020;14(3):1-3. Disponible en: http://www.ijodontostomatology.com/wp-content/uploads/2020/03/2020_v14n3_001.pdf.