

N° 494

EPIDEMIA Y NIVEL
DE ACTIVIDAD
ECONÓMICA:
UN MODELO

Waldo Mendoza e
Isaías Chalco

Epidemia y nivel de actividad económica: un modelo
Documento de Trabajo 494

©Waldo Mendoza e Isaías Chalco (autores)

Editado e Impreso:

© Departamento de Economía – Pontificia Universidad Católica del Perú,

Av. Universitaria 1801, Lima 32 – Perú.

Teléfono: (51-1) 626-2000 anexos 4950 - 4951

econo@pucp.edu.pe

<http://departamento.pucp.edu.pe/economia/publicaciones/documentos-de-trabajo/>

Encargado de la Serie: Jorge Rojas Rojas

Departamento de Economía – Pontificia Universidad Católica del Perú,

jorge.rojas@pucp.edu.pe

Primera edición – Setiembre, 2020.

ISSN 2079-8474 (En línea)

DOCUMENTO DE TRABAJO N° 494

Epidemia y nivel de actividad económica: un modelo

Waldo Mendoza e Isaías Chalco

Setiembre, 2020

DEPARTAMENTO
DE **ECONOMÍA**



DOCUMENTO DE TRABAJO 494
<http://doi.org/10.18800/2079-8474.0494>

EPIDEMIA Y NIVEL DE ACTIVIDAD ECONÓMICA: UN MODELO

Waldo Mendoza*

Isaías Chalco†

Resumen

En este trabajo¹ presentamos el modelo SIQR-M, que permite establecer una relación entre una epidemia, la política pública y el nivel de actividad económica. El canal de transmisión entre la epidemia, la economía y la política pública es la mano de obra disponible durante una pandemia a la que se enfrenta con una cuarentena. En tiempos de cuarentena solo están disponibles para el proceso productivo los trabajadores susceptibles que no están en cuarentena y los trabajadores recuperados. El modelo ha sido utilizado para hacer simulaciones acerca de los efectos de la cuarentena sobre la epidemia y el nivel de actividad económica. Los resultados más destacados son dos. En el corto plazo, la cuarentena rígida reduce el factor efectivo de reproducción de la enfermedad, la mano de obra disponible y el nivel de actividad económica con mucha más fuerza que una cuarentena parcial o la ausencia de ella. Es la disyuntiva entre la salud y la economía. En el mediano plazo, sin embargo, la ausencia de la cuarentena puede elevar significativamente el número de infectados, de tal manera que la mano de obra disponible y la producción pueden reducirse más que con una cuarentena parcial o rígida. La implicancia de política de este hallazgo es muy importante. En el mediano plazo, una cuarentena parcial o rígida puede ser mejor para la economía que la ausencia de ella. No habría, entonces, la dicotomía entre la salud y la economía detectada en el corto plazo.

Palabras claves: SIQR-M, epidemia, PIB, cuarentena, enfermedad, inmunidad

Códigos JEL: E00, I18

*Profesor e investigador del Departamento de Economía de la Pontificia Universidad Católica del Perú

†Estudiante de Economía de la Pontificia Universidad Católica del Perú

¹Los autores agradecen los importantes comentarios de Julio Villavicencio, Gabriel Rodríguez y Jorge Rojas, aunque los errores subsistentes son de nuestra entera responsabilidad.

Abstract

This paper presents the SIQR-M model, which allows to set a relationship between an epidemic, policy responses and economic activity. The channel of transmission between epidemic, economy and public policy is the available workforce. En times of quarantine, the available workforce to be operative during the productive process are composed of susceptible workers who are not in quarantine and the recovered workers. The model has been utilized to perform simulations about effects of quarantine over the epidemic and level of economic activity. There are two relevant outcomes. In the short-term, the strict quarantine diminishes the effective reproductive number of the disease, available workforce and the level of economic activity with more intensity than a partial quarantine or absence of it. This is the dilemma between health and economy. In the mid-term, however, the absence of quarantine raises significantly the quantity of infected workforce, thus decreasing the available workforce and production even more than in the cases with partial and strict quarantine. The policy implication of this finding is relevant. In the mid-term, partial or strict quarantine are the best responses for economy than the absence of it. There would be no, therefore, dilemma between health and economy detected in short-term.

Key words: SIQR-M, epidemic, GDP, quarantine, disease, immunity

JEL codes: E00, I18

Introducción

¿Cuál es el efecto de una epidemia y de las políticas públicas para contenerla en el nivel de actividad económica? En este documento intentaremos responder a esta pregunta a través de un modelo teórico en el cual las variables salud, economía y política pública están presentes, y utilizando el modelo para hacer simulaciones acerca de los efectos sobre la salud y la economía de políticas de distanciamiento social, en su versión extrema de la cuarentena.

El modelo tiene dos subsistemas. En el subsistema de la salud se presenta una extensión del modelo epidemiológico SIQR, el clásico modelo SIR al que se le agrega un compartimento de población susceptible en cuarentena. El subsistema de la economía contiene una función de producción, donde uno de los factores productivos es la mano de obra. El canal de transmisión entre la epidemia, la economía y la política pública es la mano de obra disponible durante una pandemia a la que se enfrenta con una cuarentena, conformada por los trabajadores susceptibles que no están en cuarentena y por los trabajadores recuperados. Conforme avanza la epidemia, hay más trabajadores en cuarentena y más trabajadores infectados, por lo que la actividad económica se resiente.

Posteriormente, se realizan algunas simulaciones con el objetivo de estudiar el desarrollo de la epidemia bajo distintas políticas públicas. Las simulaciones muestran que las diferencias existentes en la aplicación de políticas públicas determinan la magnitud de la caída del nivel de actividad económica y su velocidad de recuperación.

El contenido de este artículo es el siguiente. En la primera sección se presenta el modelo utilizado. Esta sección contiene dos subsecciones. La primera subsección detalla el modelo epidemiológico que será utilizado en este artículo. La segunda subsección presenta la función de producción que servirá como nexo entre ambos subsistemas para así vincular la epidemia con el nivel de actividad económica. Por otro lado, la segunda sección presenta algunas simulaciones con el objetivo de evaluar los efectos de la cuarentena en la evolución de la epidemia y el nivel de actividad económica. Finalmente, la tercera sección presenta las conclusiones e implicancias de este trabajo.

1. El Modelo

El modelo contiene dos subsistemas. El primer subsistema es una variante del clásico modelo SIR, introducido por primera vez en 1927 por Kermack y McKendrick. Este modelo permite comprender los canales de propagación de una epidemia en una población, en un determinado periodo de tiempo. El modelo contiene tres compartimientos, población susceptible, infectada y recuperada, los cuales van modificándose conforme la epidemia avanza.

El modelo básico ha tenido numerosos desarrollos, que han permitido añadir más compartimientos y así aproximarlos a la evolución de una pandemia en la vida real. Algunas de estas variantes, como las presentadas en Vaiddy et al. (2014), son el modelo SIQR, que incorpora la población infectada en cuarentena en el modelo, y el modelo SPIR, que añade la población susceptible protegida. Los autores procuraron modelar la pandemia producida por el virus H1N1 del 2009 en los Estados Unidos a través de esta familia de modelos SIR.

Nuestro modelo avanza en dos direcciones. Primero, en el primer subsistema, incorpora una variable que reproduce un hecho estilizado a nivel mundial: la cuarentena aplica también a la población susceptible, no solo a la población infectada. Para este propósito, se construye un nuevo modelo SIR, a partir de los modelos SIQR y SPIR. El modelo SPIR permite realizar una aproximación a la población susceptible en cuarentena a través de la población protegida. La población protegida, en el modelo SPIR, hace referencia a la autoprotección por parte de los individuos susceptibles a fin de evitar contraer la enfermedad. Esta autoprotección puede provenir del uso de mascarillas, lavado de manos, entre otras medidas. Combinando el modelo SIQR con el modelo SPIR, obtenemos un nuevo modelo, al que se le denominará SIQR-M o SIQR modificado. El nuevo modelo añade, por ende, a la población susceptible en cuarentena. Finalmente, en el modelo resultante se introduce una aproximación al hecho de que la cuarentena no es eterna, pues los países empiezan a relajar las restricciones impuestas a medida que la epidemia se desarrolla.

Segundo, se vincula la epidemia con la economía, incorporando una función de producción, donde uno de los factores productivos es la mano de obra. La variable que vincula

ambos subsistemas es la mano de obra disponible en tiempos de una pandemia a la que se enfrenta con la cuarentena (L_d), conformada solamente por la mano de obra que puede trabajar, es decir, los trabajadores susceptibles que no están en cuarentena y por los trabajadores recuperados. Conforme avanza la epidemia hay más trabajadores en cuarentena y más trabajadores infectados, por lo que la actividad económica se resiente. Ese es el efecto de la epidemia y la cuarentena sobre la producción.

La relación entre ambos subsistemas es asimétrica. La salud influye en la economía, pero la economía no influye en la salud. En términos matemáticos, el modelo es recursivo. Esto quiere decir que las variables endógenas del sistema de ecuaciones son determinadas una a la vez y en forma secuencial.

1.1. El SIQR-M

El subsistema de la salud en el modelo está representado por el siguiente sistema de ecuaciones.

$$N(t) = S(t) + I(t) + Q_s(t) + Q_i(t) + R(t) \quad (1)$$

$$S'(t) = -\beta S(t) \frac{I(t)}{N(t)} - \epsilon S(t) \quad (2)$$

$$I'(t) = \beta S(t) \frac{I(t)}{N(t)} - \gamma I(t) - \delta I(t) + \eta Q_s(t) \frac{I(t)}{N(t)} \quad (3)$$

$$Q'_s(t) = \epsilon S(t) - \eta Q_s(t) \frac{I(t)}{N(t)} - \omega Q_s(t) \quad (4)$$

$$Q'_i(t) = \delta I(t) - \gamma Q_i(t) \quad (5)$$

$$R'(t) = \gamma I(t) + \omega Q_s(t) + \gamma Q_i(t) \quad (6)$$

En la ecuación (1), la población total ($N(t)$) está dividida en cinco grupos o compartimentos: susceptibles ($S(t)$), aquellas personas que no han desarrollado la enfermedad y son propensas a contraerla; infectados ($I(t)$), aquellos que ya poseen la enfermedad y pueden

contagiar a otros; población susceptible e infectada en cuarentena ($Q_s(t)$ y $Q_i(t)$, respectivamente); es decir, aquellos individuos que están en confinamiento a fin de evitar que la enfermedad se propague; y recuperados ($R(t)$), los infectados que han logrado recuperarse. Los recuperados devienen en inmunes a la enfermedad. La sumatoria de los cinco grupos es la población, cuyo tamaño se asume constante. Esto quiere decir que no hay nacimientos, migración, ni fallecidos, ($N'(t) = 0$).

Las transiciones de grupo a grupo se registran en las ecuaciones diferenciales (2)-(5). En la ecuación (2) se muestra la dinámica del grupo de susceptibles, la cual está precedida de un signo negativo, pues la cantidad de personas en este grupo disminuye con el tiempo, a la par que los grupos de infectados y recuperados se eleva, y depende de la interacción entre las personas susceptibles e infectadas que no se encuentran en cuarentena. El parámetro (β) es la tasa de transmisión de la epidemia. Esta tasa depende a su vez de la tasa de contacto entre susceptibles e infectados, y de qué tan probable es que una persona susceptible se contagie. Además, a esta ecuación se le sustrae la parte de la población susceptible que será puesta en cuarentena ($\epsilon S(t)$). Esta dinámica de los susceptibles, con signo negativo es, al mismo tiempo, la cantidad de susceptibles que ingresa al grupo de infectados.

En la ecuación (3) se representa la evolución del número de infectados, que es alimentada por el crecimiento del número de susceptibles que se contagian, del que debe restarse el grupo de infectados que ingresará en cuarentena y los que se recuperarán, en ratios δ y γ respectivamente ($\delta I(t) + \gamma I(t)$), y sumarse la fracción de la población que se infecta mientras realiza la cuarentena ($\eta Q_s(t)I(t)$) a una tasa η^2 . Note que la cuarentena tiene un efecto amortiguador sobre los susceptibles que pueden ser infectados pues solo una fracción de los susceptibles y los infectados pueden entrar en contacto físico ($S(t)$ e $I(t)$, respectivamente). El ratio γ está identificado como la inversa de la cantidad de días que le requiere el infectado recuperarse ($\frac{1}{T}$).

²Los individuos podrían infectarse, a pesar de encontrarse en cuarentena, por distintas razones. Entre las más comunes se encuentran la convivencia con individuos infectados que hacen o no cuarentena, convivencia con individuos que trabajen durante la pandemia y la exposición al momento de comprar bienes de primera necesidad, entre otras.

En la ecuación (4) se muestra la evolución de la población susceptible que entra en cuarentena y no está infectada. Esta es igual a la fracción de la población susceptible que entra en cuarentena menos la suma de la población en cuarentena que se infecta con la población en cuarentena que deja paulatinamente el confinamiento, en ratios de ϵ , η y ω respectivamente. El parámetro ω es la inversa de los días que tienen que transcurrir para que se relajen las restricciones impuestas por la cuarentena ($\omega = \frac{1}{D}$). Estos días (D) varían de país en país y están sujetos a las políticas que sus gobiernos crean convenientes (i.e. cuarentena por grupo etario, por población de riesgo, etc.). Esta especificación permite que los individuos, en este primer subsistema, no permanezcan siempre en cuarentena y vuelvan a ser parte de la fuerza laboral en el segundo subsistema. Análogamente, la ecuación (5) se registra la evolución de la población infectada en cuarentena. Esta es igual a la fracción de infectados en cuarentena, menos la fracción de infectados que ingresaron en cuarentena y se recuperaron ($\gamma Q_i(t)$).

Por último, la ecuación (6) representa la evolución del número de recuperados, el cual es la suma de la fracción de infectados que logran recuperarse ($\gamma I(t)$) con la población susceptible en cuarentena que empieza a salir del confinamiento a medida que se relajen las restricciones en un ratio ω ($\omega Q_s(t)$) y los infectados que sí ingresaron a cuarentena y se lograron recuperar ($\gamma Q_i(t)$).

La ecuación fundamental de este subsistema es la que establece la dinámica del número total de infectados. ¿Bajo qué condiciones crecerá el número de infectados a lo largo del tiempo? Esto sucede cuando, en la ecuación (3), $I'(t) > 0$.

$$I'(t) = \beta S(t) \frac{I(t)}{N(t)} - \gamma I(t) - \delta I(t) + \eta Q_s(t) \frac{I(t)}{N(t)} > 0 \quad (7)$$

De la ecuación (7) se deriva que la condición para que la enfermedad se siga propagando dependa del factor efectivo de reproducción, que es el número promedio de personas a las que un individuo infectado puede contagiar. Si el factor efectivo de reproducción es mayor que la unidad, el número de infectados crece con el tiempo. Este factor depende directamente de la

tasa de transmisión de la epidemia (β) y la tasa de contagio para un individuo susceptible que se encuentre en cuarentena (η). Por otro lado, guarda relación inversa con la tasa de recuperación (γ) y la tasa de infectados que son puestos en cuarentena (δ) para así evitar la propagación de la enfermedad. Mientras más altos sean estos parámetros, menor será el factor efectivo de reproducción.

$$R = \frac{\beta \frac{S(t)}{N(t)} + \eta \frac{Q_s(t)}{N(t)}}{(\gamma + \delta)} > 1 \quad (8)$$

El factor efectivo de reproducción capta también el hecho de que, a medida que la proporción de individuos susceptibles ($\frac{S(t)}{N(t)}$) disminuye, como ocurre en toda epidemia, la transmisión de la enfermedad se vuelve más lenta. Cuando este factor es muy pequeño, se puede alcanzar la inmunidad colectiva. La inmunidad colectiva o inmunidad de grupo se refiere al hecho de que mientras más baja sea la proporción de individuos susceptibles a la enfermedad, menor será la probabilidad de que un individuo susceptible entre en contacto con uno infectado. Así mismo, como conforme se desarrolla la epidemia el número de susceptibles disminuye, lo hace también el número de susceptibles en cuarentena, con lo cual $\frac{Q_s(t)}{N(t)}$ tiende también a reducirse conforme transcurre el tiempo.

La ecuación (8) recoge el efecto de la cuarentena en la dinámica de la epidemia. Cuanto más alta sea la proporción de infectados que es puesta en cuarentena, menor es el factor R . Además, cuanto más probable sea que un individuo susceptible en cuarentena interactúe con uno infectado (η), mayor es la propagación de la epidemia. De este modo, la cuarentena es un instrumento importante del distanciamiento físico y de atenuación del crecimiento de infectados.

No obstante, en el inicio de una epidemia, la proporción de susceptibles ($\frac{S(t)}{N(t)}$) es cercana a uno y la población susceptible en cuarentena es cero ($Q_s(0) = 0$). Por consiguiente, en la literatura se estudia el factor R_0 , denominado factor básico de reproducción, que es un componente del factor efectivo de reproducción. Se denomina factor de reproducción básico al número esperado de casos secundarios derivados a partir de un único infectado en una

población totalmente susceptible a una enfermedad.

$$R_0 = \frac{\beta}{\gamma + \delta} \quad (9)$$

Este factor es teórico, pues representa lo que ocurriría si un infectado entra en contacto con una comunidad donde toda la población es susceptible, $\frac{S(t)}{N(t)} = 1$. Describe, pues, el número de infecciones nuevas que se originaron a partir del individuo infectado inicialmente. El factor básico de reproducción disminuye a medida que las tasa de población infectada en cuarentena (δ) y la tasa de recuperación de la enfermedad (γ) aumentan mientras que dicho factor crece a medida que la tasa de transmisión de la epidemia aumenta (β).

1.2. La producción y la mano de obra

En este subsistema se asume que el número total de trabajadores es una fracción de la población total. Sin embargo, con el fin de simplificar, asumiremos que esta fracción es igual a 1, con lo cual la población trabajadora es igual a la población total y es también constante. Para relacionar la producción con el empleo utilizamos una función de producción del tipo Cobb-Douglas. De acuerdo con la ecuación (10), la producción es una función de la productividad total de factores, el stock de capital y la única variable que en este modelo se modifica con el tiempo es la mano de obra disponible en tiempos de pandemia y cuarentena. Esta variable está constituida por los trabajadores susceptibles que no están en cuarentena y por los trabajadores que se han recuperado de la epidemia.

$$Y(t) = AK(t)^\alpha L_d(t)^{1-\alpha} \quad (10)$$

$$L(t) = N(t) = S(t) + I(t) + Q_s(t) + Q_i(t) + R(t) \quad (11)$$

$$L_d(t) = L(t) - I(t) - Q_s(t) - Q_i(t) = S(t) + R(t) \quad (12)$$

La ecuación (11) representa la población trabajadora. Esta es igual a la población total, la cual está conformada por los cinco compartimientos del modelo SIQR-M. Es decir, población susceptible, población infectada, población susceptible en cuarentena, población infectada en cuarentena y recuperados. La ecuación (12) muestra la población trabajadora disponible durante una epidemia. Esta es igual a la población trabajadora total menos la población infectada, la población susceptible en cuarentena y la población infectada en cuarentena. Derivando la ecuación (12) con respecto al tiempo y sabiendo que $N'(t) = 0$ (población constante):

$$L'_d(t) = L'(t) - I'(t) - Q'_s(t) - Q'_i(t) \quad (13)$$

$$L'_d(t) = -(I'(t) + Q'_s(t) + Q'_i(t)) \quad (14)$$

La ecuación (13) representa a la dinámica de la mano de obra disponible durante una epidemia con cuarentena. Esta es igual al cambio del número total de trabajadores menos el cambio de los trabajadores susceptibles e infectados que entran en cuarentena. Por lo tanto, la ecuación (14) es a su vez la dinámica de la mano de obra disponible durante una epidemia puesto que la población trabajadora es constante e invariante en el tiempo ($L'(t) = N'(t) = 0$). Derivando la ecuación (10) con respecto al tiempo:

$$Y'(t) = AK(t)^\alpha(1 - \alpha)L_d(t)^{-\alpha}L'_d(t) \quad (15)$$

Reemplazando la ecuación (14) en (15):

$$Y'(t) = -AK(t)^\alpha(1 - \alpha)L_d(t)^{-\alpha}(I'(t) + Q'_s(t) + Q'_i(t)) \quad (16)$$

si multiplicamos por $\frac{L_d(t)}{L_d(t)}$ al lado derecho de la ecuación obtenemos la dinámica del producto en términos per-cápita:

$$Y'(t) = -y(t)(1 - \alpha)(I'(t) + Q'_s(t) + Q'_i(t)) \quad (17)$$

, donde $y(t) = \frac{AK^\alpha L_d(t)^{1-\alpha}}{L_d}$. Esto, con el objetivo de simplificar la notación. Utilizando las ecuaciones diferenciales del modelo SIQR-M y reemplazando en (17):

$$Y'(t) = -y(t)(1 - \alpha) \left(\beta S(t) \frac{I(t)}{N(t)} - \gamma I(t) - \delta I(t) + \eta Q_s(t) \frac{I(t)}{N(t)} + \epsilon S(t) - \eta Q_s(t) \frac{I(t)}{N(t)} - \omega Q_s(t) + \delta I(t) - \gamma Q_i(t) \right) \quad (18)$$

Finalmente, desarrollando la ecuación (18):

$$Y'(t) = -y(t)(1 - \alpha) \left(\beta S(t) \frac{I(t)}{N(t)} + \epsilon S(t) - \gamma I(t) - \omega Q_s(t) - \gamma Q_i(t) \right) \quad (19)$$

Este modelo, al ser de corto plazo, tiene como supuesto que tanto la tecnología asociada al factor de trabajo (A) como el stock de capital (K) son constantes e invariantes en el tiempo; esto quiere decir, $A'(t) = 0$ y $K'(t) = 0$. Por consiguiente, dado el supuesto de no fallecimientos del modelo SIQR-M, el producto se encuentra inicialmente en su estado estacionario.

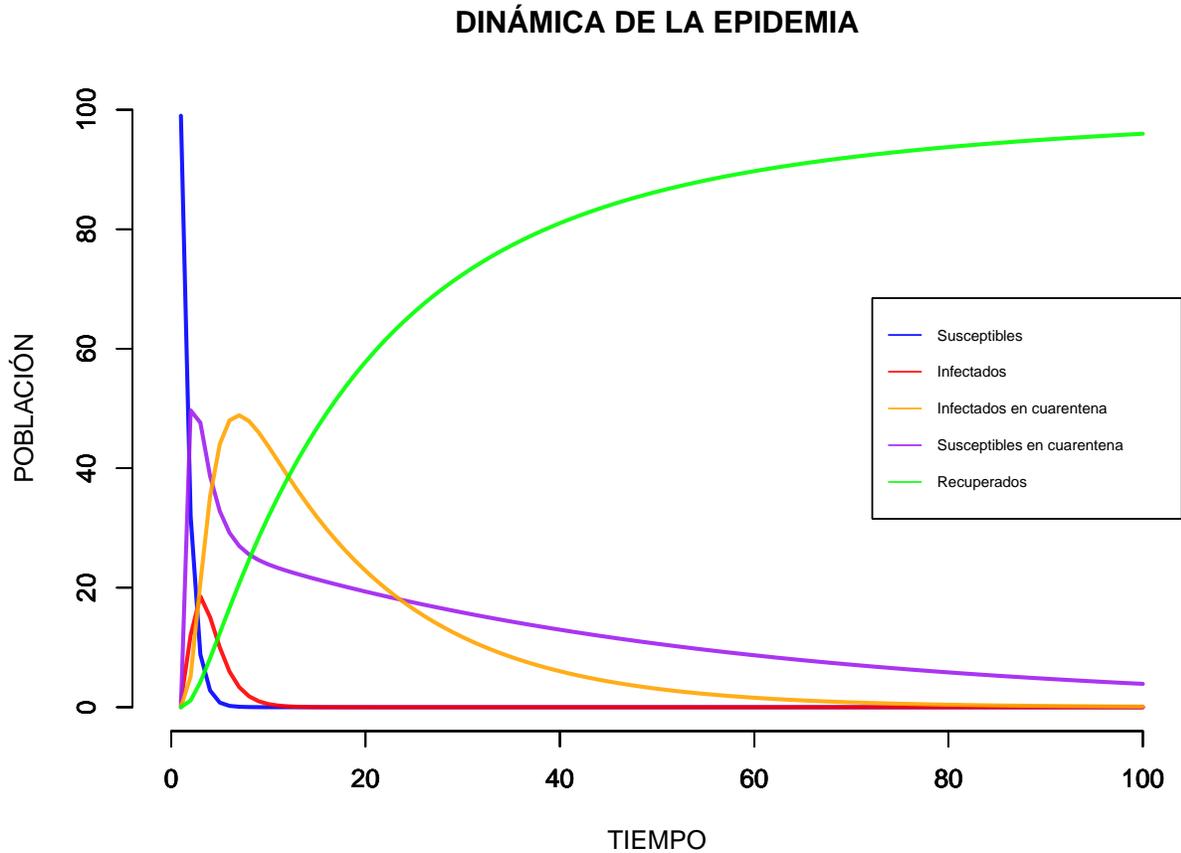
La ecuación (19) permite observar la dinámica de la producción a través del tiempo. La dinámica del producto depende negativamente de los nuevos infectados en cada periodo t ($\beta S(t) \frac{I(t)}{N(t)}$) y de la fracción de trabajadores susceptibles que son puestos en cuarentena. Por otro lado, esta dinámica depende positivamente de los trabajadores infectados que se recuperan de la enfermedad a una tasa γ ($\gamma I(t)$), de la población infectada en cuarentena que se recupera de la enfermedad a la misma tasa ($\gamma Q_i(t)$), y de los trabajadores susceptibles en cuarentena que empiezan a salir del confinamiento a una tasa ω ($\omega Q_s(t)$), pues estos grupos son parte de la mano de obra disponible para el proceso productivo.

2. Efectos de la cuarentena

¿Cuáles son los efectos de una cuarentena en la evolución de la epidemia y el nivel de actividad económica? En esta sección responderemos a esta pregunta a través de un ejercicio

de simulación. El ejercicio consiste en resolver el sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias del modelo SIQR-M. Para esto, se introducen los parámetros y las condiciones iniciales del sistema. Por último, a través de procesos computacionales, se determinan el estado de los compartimientos en los distintos periodos de tiempo.

Figura 1: Evolución de la epidemia



Solución al modelo SIQR-M para valores de $I_0 = 1$; $R_0 = 5.7$; $\eta = \frac{\beta}{4}$; $\epsilon = 0.9$; $\delta = 0.9$; $D = 50$ y $T = 15$

La figura 1 muestra la dinámica de una epidemia cuando el factor básico de reproducción es igual a 5.7. Este valor fue tomado a partir del estudio de Sanche et al. (2020), donde, con el objetivo de establecer un R_0 para la enfermedad por coronavirus de 2019 (COVID-19) y a partir de la tasa de crecimiento exponencial observada, calcula los valores de R siendo la media de este 5.7. Este factor, en ausencia de cuarentena, ocasionaría que buena parte de la

población se infectase con la enfermedad debido a la alta tasa de propagación. Sin embargo, en el contexto del SIQR-M, el hecho de que los individuos (infectados y susceptibles) sean puestos en cuarentena en los primeros días de una epidemia, evita que el porcentaje de población infectada se eleve rápidamente.

La curva azul representa la dinámica de los susceptibles³. Este grupo disminuye de manera abrupta en los primeros periodos. A diferencia de los modelos SIR (ver Apéndice 1), donde la disminución del grupo de susceptibles era más gradual, en este modelo, la caída rápida del grupo de susceptibles se debe a que en un momento temprano de la epidemia, gran parte de los susceptibles son puestos en cuarentena a un ratio $\epsilon = 0,9$. De manera análoga, la curva naranja muestra la parte del grupo de los individuos que son infectados e ingresan a cuarentena a un ratio $\delta = 0,9$.

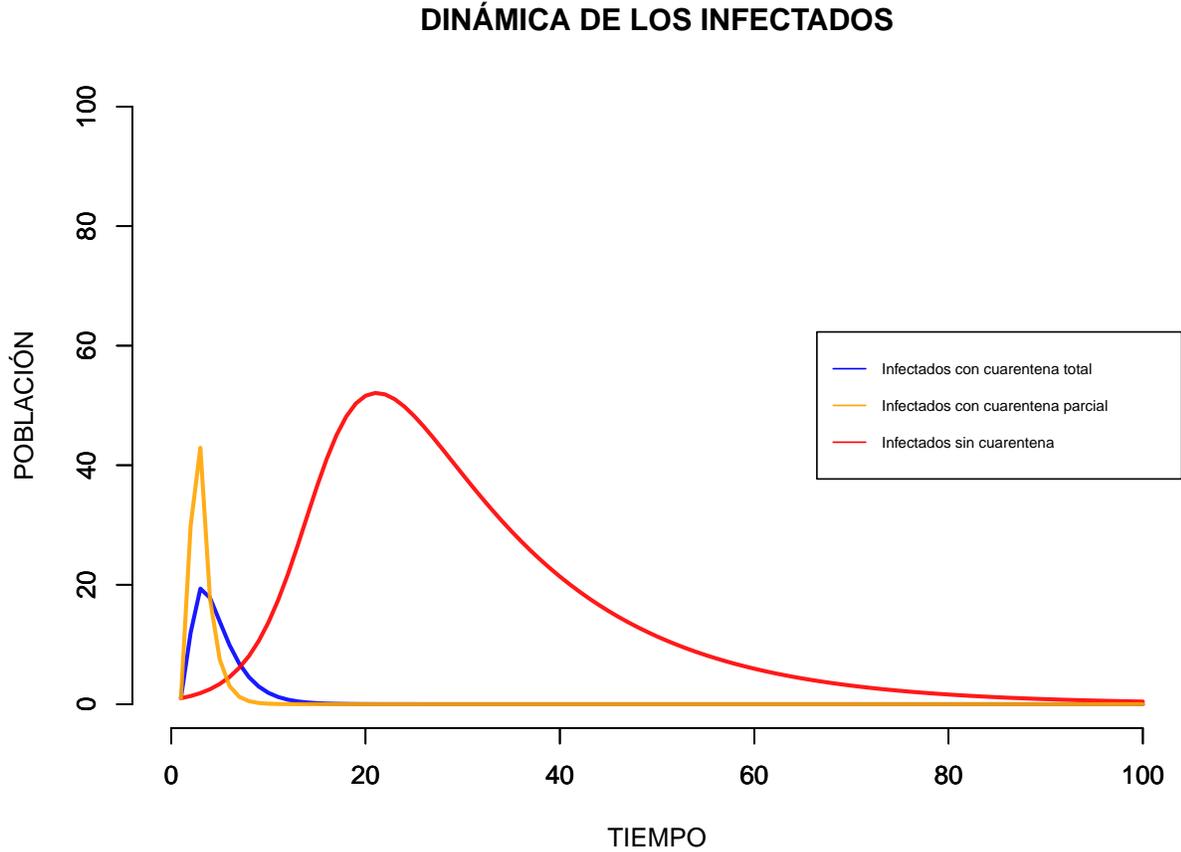
Finalmente, la curva verde representa la dinámica de la población recuperada. Este grupo crecerá a medida que los infectados y los infectados que se encuentren en cuarentena se recuperen a un ratio $\gamma = \frac{1}{15}$ ⁴. Además, en este modelo se asume que parte de los susceptibles que se encuentran en cuarentena entran al grupo de recuperados. Esta es una característica nueva en los modelos de la familia SIR, pues se consideraba, a lo más, a la población infectada en cuarentena. A medida de que se relajan las restricciones. Estas restricciones están representadas por la inversa de los días que durará la cuarentena ($\omega = \frac{1}{50}$). Esto provoca que la transición del grupo de susceptibles en cuarentena hacia el grupo de recuperados se dé gradualmente.

La figura 2 compara la dinámica de los infectados en los casos cuando existe una política de cuarentena estricta o total ($\epsilon = 0,9$ y $\delta = 0,9$) contra los casos cuando se impone una cuarentena parcial ($\epsilon = 0$ y $\delta = 0,9$) y no se aplica alguna de estas medidas ($\epsilon = 0$ y $\delta = 0$). Las curvas resultantes de las simulaciones difieren en gran medida entre sí. La curva azul representa la evolución de los infectados cuando existe cuarentena tanto para los individuos

³Recuerde que son los susceptibles que no se encuentran en cuarentena

⁴El valor de numérico ha sido escogido a partir del reporte del COVID-19 de la Organización Mundial de la Salud en conjunto con China.

Figura 2: Evolución de los infectados

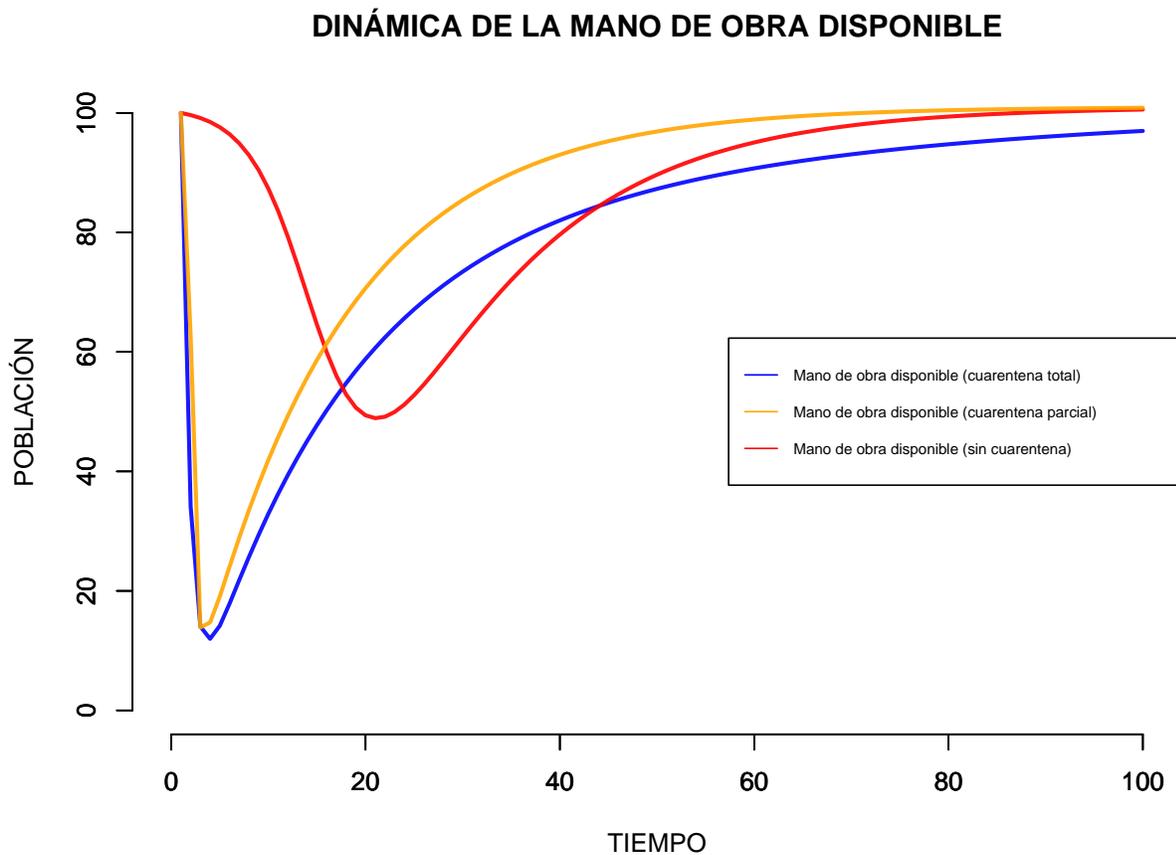


Solución al modelo SIQR-M para valores de $I_0 = 1$; $R_0 = 5.7$; $\eta = \frac{\beta}{4}$; $\epsilon = 0.9$; $\delta = 0.9$; $D = 50$ y $T = 15$

infectados como para la población susceptible. Esta curva contempla una cuarentena estricta o total. Esto es, cuando tanto la población susceptible ($S(t)$) como la infectada ($I(t)$) son puestas en cuarentena en ratios de $\epsilon = 0,9$ y $\delta = 0,9$, respectivamente. Esta curva azul tiene una meseta menor a la curva naranja y significativamente menor a la curva roja, las cuales contemplan los casos de una cuarentena enfocada solamente en los infectados y la ausencia de cuarentena como medida ante la propagación de la enfermedad, respectivamente. La curva naranja muestra el hecho de aplicar una cuarentena focalizada en los individuos infectados y no en la población susceptible. Esto, en ratios de $\epsilon = 0$ y $\delta = 0,9$. El hecho de no tener a la población susceptible en confinamiento ocasiona que el número de infectados se eleve

más en comparación al caso de confinamiento total. Esto, debido que a que la fracción de población susceptible es parte del factor efectivo de reproducción. Por último, la curva roja representa el caso cuando $\epsilon = 0$ y $\delta = 0$. Esto provoca una cantidad significativamente mayor de infectados comparado a los dos casos anteriores. Por ello, se observa que el valor de la meseta de la curva roja se acerca al 40% de la población. Entonces, la simulación de la cantidad de infectados muestra que a mayores medidas de contención se logra contener la propagación de la enfermedad y así el número de infectados.

Figura 3: Mano de obra disponible durante la pandemia



Solución a la dinámica del de la mano de obra disponible en tiempos de pandemia

La figura 3 muestra la dinámica de la mano de obra disponible durante una pandemia en tres escenarios, de cuarentena total, parcial y sin cuarentena. La dinámica de la mano

de obra disponible en tiempos de pandemia depende, en gran medida, de la parte de los trabajadores susceptibles que es puesta en cuarentena.

En el caso en el que se aplica una cuarentena total se produce una caída pronunciada de la mano de obra disponible (curva azul). La mano de obra disponible volverá a su estado inicial cuando la cuarentena empiece a flexibilizarse y de este modo lograr que los trabajadores puestos en cuarentena vuelvan a ser parte de la mano de obra disponible.

Por otra parte, cuando se aplica la cuarentena parcial, el descenso de la mano de obra disponible es menor (curva naranja), comparado con el escenario anterior, a lo largo de todo el periodo de la epidemia. Sin embargo, esta caída sigue siendo pronunciada debido al hecho de que no se han aislado a los trabajadores susceptibles. La razón es que el factor efectivo de reproducción (R) es mayor respecto al caso anterior (ver ecuación (8)), pues la proporción de trabajadores susceptibles es mayor. En consecuencia, la propagación de la enfermedad se dará con mayor intensidad resultando así en una proporción mayor de trabajadores infectados que no podrán laborar y, por consiguiente, en una menor cantidad de mano de obra disponible en la economía.

Finalmente, cuando no se aplica ninguna medida de contención contra la propagación de la enfermedad (curva roja), el descenso de la mano de obra disponible es menor que en los dos casos anteriores, por lo menos en el corto plazo⁵. Este hecho ocurre como consecuencia de que la población susceptible no entra en cuarentena. En este caso, solo los infectados dejan de ser parte de la mano de obra disponible durante la epidemia. Por ello, la curva roja guarda similitud, de manera inversa, con la curva de infectados cuando no se aplica la cuarentena de la figura 2.

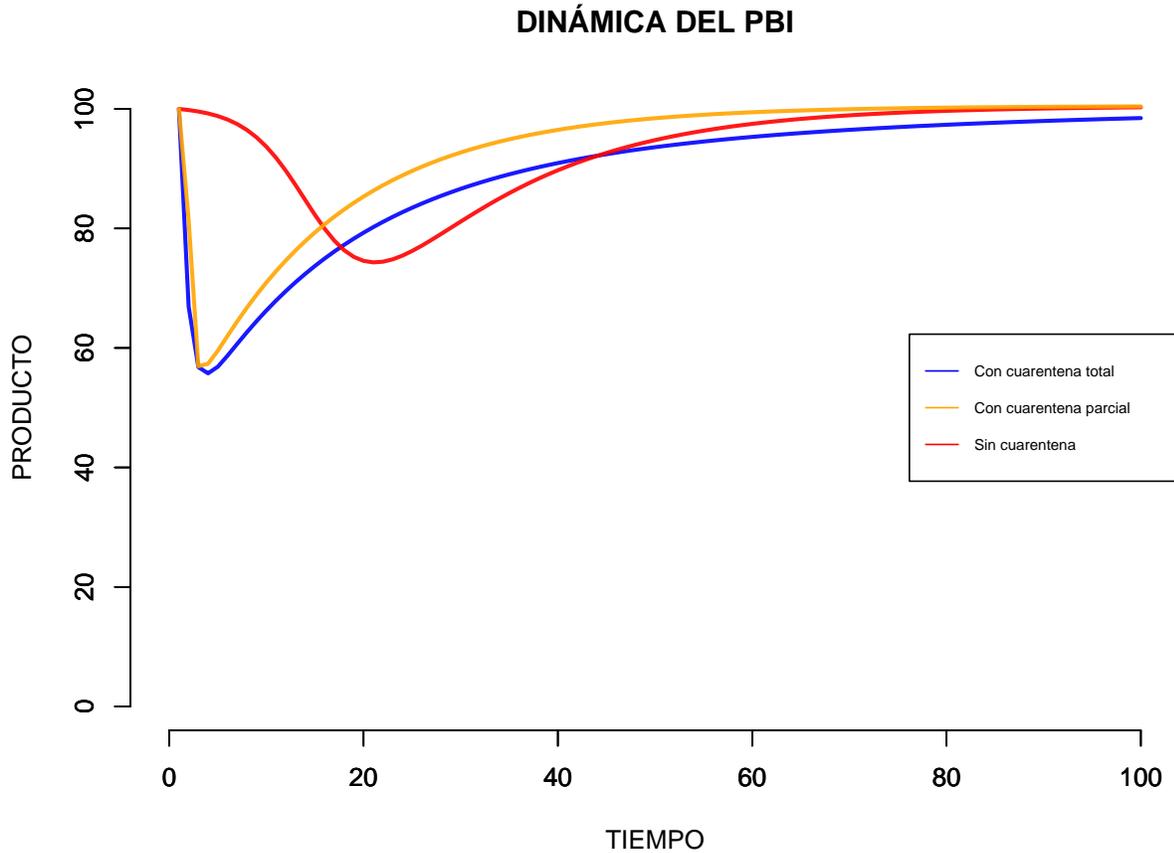
En el mediano plazo⁶, sin embargo, el resultado puede ser distinto, tal como se muestra en la figura 3. En esta figura, hay un momento, después del periodo 20, en el que la caída de la mano de obra disponible sin cuarentena es mayor que la caída con cuarentena parcial.

⁵Denominamos corto plazo, en un sentido laxo, a las primeras etapas de la epidemia. Es decir, cuando el factor efectivo de reproducción es mayor a la unidad, $R > 1$.

⁶En las etapas intermedias de la epidemia.

Esto ocurre porque el número de infectados cuando no hay cuarentena está elevándose a una velocidad mayor que el número de infectados que está ingresando a cuarentena.

Figura 4: Evolución del PBI durante la epidemia



Solución a la dinámica del PIB para valores de $K = 100$, $A = 1$, $\alpha = 0.5$

Por último, si se conoce la trayectoria de la mano de obra disponible, es fácil predecir la trayectoria de la producción, a través de la función de producción. Es lo que se muestra en la figura 4. Como en el caso de la mano de obra disponible, cabe la posibilidad de que el descenso de la producción con cuarentena parcial sea menor que en ausencia de cuarentena.

La implicancia de política de esta posibilidad es muy importante. En el mediano plazo, una cuarentena parcial puede ser mejor para la economía que la ausencia de ella. No habría, por lo tanto, en el mediano plazo, la dicotomía entre salud y economía detectada en el corto

plazo.

Evidentemente, todos estos resultados están asociados a los parámetros elegidos y a las condiciones iniciales supuestas para nuestras simulaciones.

3. Conclusiones e implicancias

En este trabajo se ha presentado el modelo teórico SIQR-M, que relaciona la epidemia con la economía, siendo el canal de transmisión la mano de obra disponible durante una pandemia. Cuando la política pública de lucha contra la pandemia es la cuarentena, la mano de obra disponible está compuesta por los trabajadores susceptibles que no están en cuarentena y por los trabajadores recuperados. El modelo ha sido utilizado para hacer simulaciones acerca de los efectos de la cuarentena sobre la epidemia y el nivel de actividad económica. Los resultados más destacados son dos.

Primero, en el corto plazo, la cuarentena rígida reduce de manera importante el factor efectivo de reproducción, disminuye la velocidad de propagación de la epidemia, pero hace caer la mano de obra disponible, y por tanto el nivel de actividad económica. La cuarentena parcial reduce en menor medida tanto el factor efectivo de reproducción como la producción. Esto ocurre debido a que una fracción menor de los trabajadores está en cuarentena. Así mismo, la ausencia de cuarentena incrementa dicho factor y no ocasiona una caída pronunciada de la producción en los primeros periodos de la epidemia. Es la disyuntiva entre la salud y la economía. Segundo, en el mediano plazo, el resultado sobre la mano de obra disponible y el nivel de actividad económica puede ser distinto. La ausencia de la cuarentena puede elevar significativamente el número de infectados, de tal manera que la mano de obra disponible y la producción pueden reducirse aun más que con una cuarentena parcial y rígida.

La implicancia de política de este hallazgo es muy importante. En el mediano plazo, una cuarentena parcial o rígida puede ser mejor para la economía que la ausencia de ella. No habría, por tanto, la dicotomía entre la salud y la economía detectada en el corto plazo.

Referencias

Kermack, W.O. and A.G. McKendrick (1927). “A Contribution to the Mathematical Theory of Epidemics.” *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*, 115:700-721.

World Health Organization (2020). Report of the WHO-China Joint Mission on Coronavirus Disease 2019 (COVID-19). Department of Communications. [https://www.who.int/report-of-the-who-china-joint-mission-on-coronavirus-disease-2019-\(covid-19\)](https://www.who.int/report-of-the-who-china-joint-mission-on-coronavirus-disease-2019-(covid-19)).

Pei Y., Liu S., Gao S., Li S. & Li Ch. (2009). “A delayed SEIQR epidemic model with pulse vaccination and the quarantine measure”. *Computers and Mathematics with Applications*, 58, 135-145.

Sanche, S., Lin, Y., Xu, C., Romero-Severson, E., Hengartner, N., Ke, R. (2020). High Contagiousness and Rapid Spread of Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2. *Emerging Infectious Diseases*, 26(7), 1470-1477. <https://dx.doi.org/10.3201/eid2607.200282>.

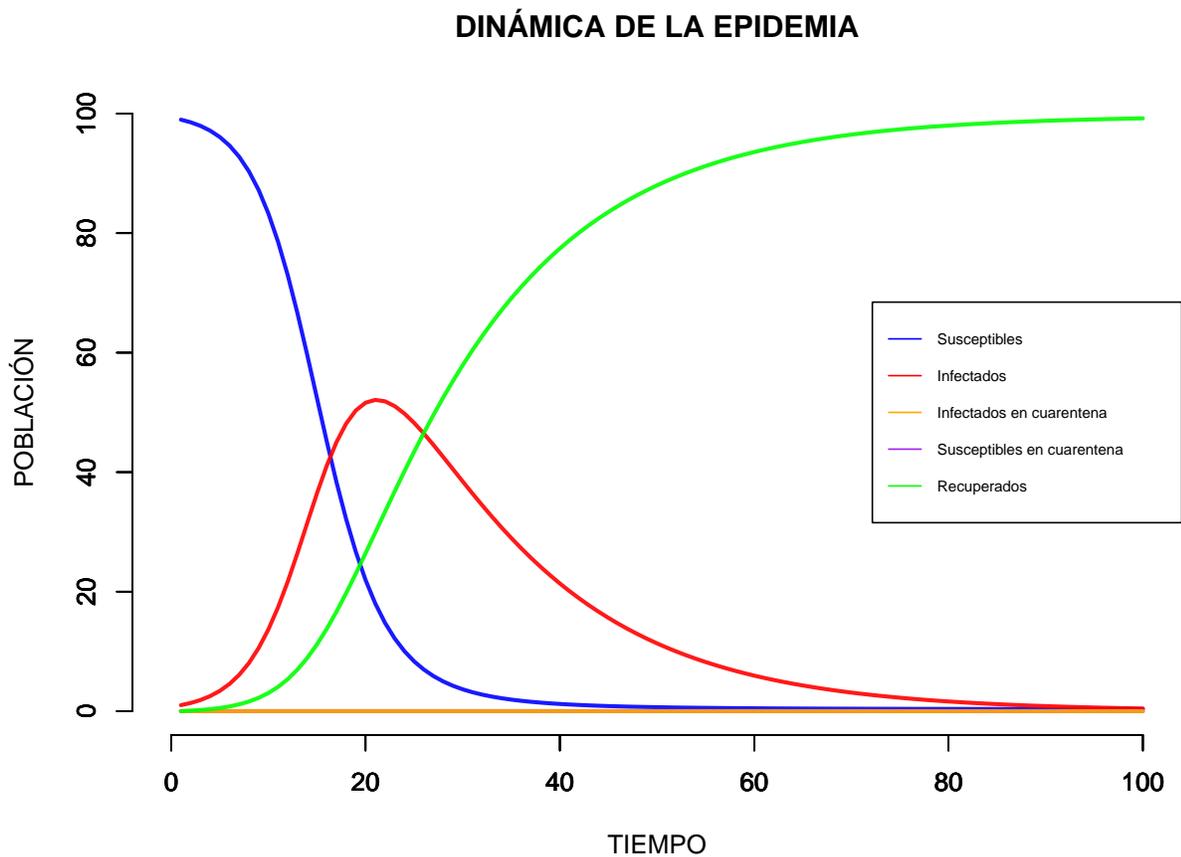
Schiller, Robert (2019). “Narrative Economics: How Stories Go Viral and Drive Major Economic Events”. Princeton University Press, pp. 289-298.

Vaidya, N. K., Morgan, M., Jones, L., Miller, Lapin, S. & Schwartz E. J. (2015). “Modelling the epidemic spread of an H1N1 influenza outbreak in a rural university town”. *Epidemiol. Infect.*, 143, 1610–1620.

Apéndice

Apéndice 1

Figura 5: Evolución de la epidemia (sin cuarentena parcial y estricta)



Solución al modelo SIQR-M para valores de $I_0 = 1$; $R_0 = 5.7$; $\eta = \frac{\beta}{4}$; $\epsilon = 0$; $\delta = 0$; $D = 50$ y $T = 15$

La figura 5 muestra la evolución de una epidemia para el caso cuando no existe cuarentena estricta ni parcial. Esto se logra haciendo que los valores de los parámetros η y δ sean iguales a cero. Como se puede observar, el resultado es la evolución de la epidemia en un modelo SIR básico.

**ÚLTIMAS PUBLICACIONES DE LOS PROFESORES
DEL DEPARTAMENTO DE ECONOMÍA**

▪ *Libros*

Roxana Barrantes y Paulo Matos

2020 *Making Open Development Inclusive: Lessons from IDRC Research. Capítulo 9. Who Benefits from Open Models? The Role of ICT Access in the Consumption of Open Activities.* Londres, IDRC, MIT Press.

Cecilia Garavito

2020 *Microeconomía: Consumidores, productores y estructuras de mercado. Segunda edición.* Lima, Fondo Editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú.

Adolfo Figueroa

2019 *The Quality of Society Essays on the Unified Theory of Capitalism.* New York. Palgrave MacMillan.

Carlos Contreras y Stephan Gruber (Eds.)

2019 *Historia del Pensamiento Económico en el Perú. Antología y selección de textos.* Lima, Facultad de Ciencias Sociales PUCP.

Barreix, Alberto Daniel; Corrales, Luis Fernando; Benitez, Juan Carlos; Garcimartín, Carlos; Ardanaz, Martín; Díaz, Santiago; Cerda, Rodrigo; Larraín B., Felipe; Revilla, Ernesto; Acevedo, Carlos; Peña, Santiago; Agüero, Emmanuel; Mendoza Bellido, Waldo; Escobar Arango y Andrés.

2019 *Reglas fiscales resilientes en América Latina.* Washington, BID.

José D. Gallardo Ku

2019 *Notas de teoría para para la incertidumbre.* Lima, Fondo Editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú.

Úrsula Aldana, Jhonatan Clausen, Angelo Cozzubo, Carolina Trivelli, Carlos Urrutia y Johanna Yancari

2018 *Desigualdad y pobreza en un contexto de crecimiento económico.* Lima, Instituto de Estudios Peruanos.

Séverine Deneulin, Jhonatan Clausen y Arely Valencia (Eds.)

2018 *Introducción al enfoque de las capacidades: Aportes para el Desarrollo Humano en América Latina.* Flacso Argentina y Editorial Manantial. Fondo Editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú.

Mario Dammil, Oscar Dancourt y Roberto Frenkel (Eds.)

2018 *Dilemas de las políticas cambiarias y monetarias en América Latina.* Lima, Fondo Editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú.

▪ *Documentos de trabajo*

- No. 493 “Competencia, alcance social y sostenibilidad financiera en las microfinanzas reguladas peruanas”. Giovanna Aguilar Andía y Jhonatan Portilla Goicochea. Setiembre, 2020.
- No. 492 “Empoderamiento de la mujer y demanda por servicios de salud preventivos y de salud reproductiva en el Perú 2015-2018”. Pedro Francke y Diego Quispe O. Julio, 2020.
- No. 491 “Inversión en infraestructura y demanda turística: una aplicación del enfoque de control sintético para el caso Kuéalp, Perú”. Erick Lahura y Rosario Sabrera. Julio, 2020.
- No. 490 “La dinámica de inversión privada. El modelo del acelerados flexible en una economía abierta”. Waldo Mendoza Bellido. Mayo, 2020.
- No. 489 “Time-Varying Impact of Fiscal Shocks over GDP Growth in Peru: An Empirical Application using Hybrid TVP-VAR-SV Models”. Álvaro Jiménez y Gabriel Rodríguez. Abril, 2020.
- No. 488 “Experimentos clásicos de economía. Evidencia de laboratorio de Perú”. Kristian López Vargas y Alejandro Lugon. Marzo, 2020.
- No. 487 “Investigación y desarrollo, tecnologías de información y comunicación e impactos sobre el proceso de innovación y la productividad”. Mario D. Tello. Marzo, 2020.
- No. 486 “The Political Economy Approach of Trade Barriers: The Case of Peruvian’s Trade Liberalization”. Mario D. Tello. Marzo, 2020.
- No. 485 “Evolution of Monetary Policy in Peru. An Empirical Application Using a Mixture Innovation TVP-VAR-SV Model”. Jhonatan Portilla Goicochea y Gabriel Rodríguez. Febrero, 2020.
- No. 484 “Modeling the Volatility of Returns on Commodities: An Application and Empirical Comparison of GARCH and SV Models”. Jean Pierre Fernández Prada Saucedo y Gabriel Rodríguez. Febrero, 2020.
- No. 483 “Macroeconomic Effects of Loan Supply Shocks: Empirical Evidence”. Jefferson Martínez y Gabriel Rodríguez. Febrero, 2020.
- No. 482 “Acerca de la relación entre el gasto público por alumno y los retornos a la educación en el Perú: un análisis por cohortes”. Luis García y Sara Sánchez. Febrero, 2020.
- No. 481 “Stochastic Volatility in Mean. Empirical Evidence from Stock Latin American Markets”. Carlos A. Abanto-Valle, Gabriel Rodríguez y Hernán B. Garrafa-Aragón. Febrero, 2020.
- No. 480 “Presidential Approval in Peru: An Empirical Analysis Using a Fractionally Cointegrated VAR2”. Alexander Boca Saravia y Gabriel Rodríguez. Diciembre, 2019.

- No. 479 “La Ley de Okun en el Perú: Lima Metropolitana 1971 – 2016.” Cecilia Garavito. Agosto, 2019.
- No. 478 “Peru’s Regional Growth and Convergence in 1979-2017: An Empirical Spatial Panel Data Analysis”. Juan Palomino y Gabriel Rodríguez. Marzo, 2019.
- No. 477 “The Mundell-Fleming Model: A dirty float versión”. Waldo Mendoza Bellido. Marzo, 2019.
- No. 476 “Políticas de estabilización vs Políticas de crecimiento en Perú 2011-2018”. José A. Oscategui. Febrero, 2019.

▪ *Materiales de Enseñanza*

- No. 5 “Matemáticas para Economistas 1”. Tessy Vázquez Baos. Abril, 2019.
- No. 4 “Teoría de la Regulación”. Roxana Barrantes. Marzo, 2019.
- No. 3 “Economía Pública”. Roxana Barrantes, Silvana Manrique y Carla Glave. Marzo, 2018.
- No. 2 “Macroeconomía: Enfoques y modelos. Ejercicios resueltos”. Felix Jiménez. Marzo, 2016.
- No. 1 “Introducción a la teoría del Equilibrio General”. Alejandro Lugon. Octubre, 2015.