

**N° 25-2019**

Abril

INFORME ESPECIAL

**Macroeconomía en los  
tiempos del COVID-19: un  
análisis de equilibrio  
dinámico estocástico para  
Colombia**

# Macroeconomía en los tiempos del COVID-19: un análisis de equilibrio dinámico estocástico para Colombia

Jesús Botero\*<sup>1</sup> - Matheo Arellano<sup>‡2</sup> - Marcos González<sup>§-</sup> - Diego Montañez<sup>†</sup>

Grupo de Análisis de Coyuntura Económica. Universidad EAFIT

## Palabras claves

Covid-19, Modelo de Equilibrio General Dinámico Estocástico (DSGE), Modelo SIR, Medidas de contención y mitigación.

## Resumen

Tanto economistas como epidemiólogos cuentan con una muy buena batería de modelos para analizar la evolución y las consecuencias de la pandemia que azota al mundo. No obstante, para el análisis del COVID-19, los modelos económicos deben combinarse con modelos de transmisión de enfermedades para incluir dinámicas de propagación de brotes y evaluar sus efectos. Los modelos matemáticos como el Susceptible-Infectious-Recovered (SIR) y sus extensiones producen curvas de evolución de la enfermedad a través de las cuales los modelos económicos pueden capturar el impacto, tanto de la enfermedad como de las medidas que se implementan para contenerla, en la producción, en la oferta de trabajo y en el consumo.

En este sentido, se desarrolla un modelo de Equilibrio General Dinámico Estocástico (DSGE) para la economía colombiana con frecuencia semanal que permite integrar el modelo epidemiológico estándar SIR para el análisis de los efectos económicos de la propagación del COVID-19 en el país. Se extiende el modelo epidemiológico canónico para estudiar la interacción entre las decisiones económicas de varios tipos de agentes y la

---

\* Docente-investigador del departamento de economía, universidad EAFIT. Email: jabotero@eafit.edu.co

‡<sup>2</sup> Magíster en economía de la Universidad EAFIT. Email: marellanom@eafit.edu.co

† Integrante del Grupo de Coyuntura Económica de la Universidad EAFIT. Email: dfmontaneh@eafit.edu.co

§ Integrante del Grupo de Coyuntura Económica de la Universidad EAFIT. Email: megonzale@eafit.edu.co

propagación de la pandemia. Se analiza el impacto económico de la crisis COVID-19 con simulaciones de políticas de contención para cuantificar los resultados de dichas intervenciones por parte del gobierno y sus efectos dinámicos. Se estiman los posibles costos económicos del COVID-19 y la senda del crecimiento del PIB y del empleo comparando el escenario base respecto a escenarios alternativos de políticas de contención. Se concluye que las medidas de contención agudizan los costos económicos, pero si son efectivas y están acotada en el tiempo, permiten una recuperación más rápida de la actividad económica, minimizando así los costos totales en términos de vidas y de medios de vida.

### **Introducción**

Las vidas humanas están amenazadas por el brote de la nueva enfermedad de Coronavirus 2019 (COVID-19), que está causando fuertes estragos en la economía mundial y cuya expansión ha superado cualquier expectativa pesimista, llegando el jueves 16 de abril de 2020 a registrarse más de dos millones de casos confirmados de SARS-CoV-2 en el mundo. La pandemia ha dejado ya más 100 mil fallecidos y tiene presencia en 190 países, de acuerdo con el recuento de la universidad estadounidense Johns Hopkins, en una de las páginas más consultadas del mundo para el análisis de la enfermedad. En este sentido, ya nadie duda de la seriedad con que debe enfrentarse y, por consiguiente, de los cambios que deben implementarse en las políticas económicas a nivel mundial. Diversos analistas en todo el mundo están pidiendo acciones coordinadas rápidas para contener el daño de la pandemia global y para retornar progresivamente a niveles aceptables de operación de la economía.

Ahora bien, tanto economistas como epidemiólogos cuentan con una muy buena batería de modelos para analizar la evolución y las consecuencias de la pandemia que azota al mundo. Los economistas disponen de modelos de equilibrio general, que permiten analizar en detalle no sólo los efectos de restricciones en la oferta y demanda sobre los mercados de bienes, servicios y factores, sino también los impactos distributivos sobre los hogares y sobre la vulnerabilidad y la pobreza, y los efectos colaterales sobre las finanzas públicas, afectadas por la expansión de gasto y la reducción de ingresos tributarios que seguramente se producen por efecto de la pandemia. Cuentan además con modelos dinámicos estocásticos (DSGE), que pueden abordar aquellas cuestiones relativas a la dinámica económica que se

relacionan con las decisiones inter-temporales que los agentes adoptan con relación a su consumo, a la inversión, o a la dinámica de la oferta laboral, y que permiten indagar acerca de los efectos conjuntos de la pandemia sobre la trayectoria futura de la actividad económica.

Los epidemiólogos, por su parte, cuentan con una amplia gama de modelos SIR (Susceptibles, Infectados, Recuperados), que analizan trayectorias dinámicas del contagio y permiten analizar los temas relativos a la duración e intensidad de la enfermedad, la congruencia de los servicios sanitarios y hospitalarios con la atención requerida, y los impactos de las medidas de contención que se adopten.

Pero lo que no es todavía habitual es la consolidación de esos modelos en un esquema integral, que permitan la interacción entre efectos económicos y la dinámica de infección. La enfermedad afecta sustancialmente la actividad económica, limitando la oferta de bienes y servicios, alterando las conductas de los consumidores y restringiendo las posibilidades de trabajo de que disponen los hogares. Por esa vía, genera problemas económicos y humanos tan complejos y difíciles como la propia pandemia: reducción de fuentes de ingreso para grupos sociales vulnerables; desempleo creciente; fracturas en el sistema productivo que afectan la capacidad de la sociedad de generar bienestar para los ciudadanos.

En respuesta a la pandemia, hay que adoptar medidas de contención, que son igualmente dolorosas para muchos ciudadanos y disruptivas para el sistema productivo: las medidas de distanciamiento social que se imponen como respuesta a la pandemia restringen el consumo y la oferta de trabajo, limitan la productividad efectiva de las empresas (llegando incluso a detener su producción) y generan dolores adicionales a quienes están al margen del sistema económico, como trabajadores informales y “por cuenta propia”, que viven del día a día y que ven desaparecer los contactos sociales de los que dependía su ingreso.

Los costos del distanciamiento no son marginales: pueden traducirse en caídas significativas de la producción de la sociedad; en pobreza, miseria y desespero de grupos desvalidos; y en reducciones significativas de la capacidad futura de generar riqueza y bienestar. Pero se toman por dos razones fundamentales: de una parte, porque pueden contener la enfermedad, evitando que desborde la capacidad de atención de nuestros enfermos; y, de otra, porque permiten avizorar una salida más pronta de la crisis, que evite la destrucción del aparato productivo, y la extensión en el tiempo de los efectos de la pandemia.

Así, la pandemia desata efectos económicos importantes, que afectan la vida y el bienestar de los ciudadanos; y las medidas económicas afectan la trayectoria de la enfermedad, al tiempo que definen la rudeza con la que han de impactar a la población y las posibilidades futuras de recuperación al final de la pesadilla. Dados esos efectos cruzados entre enfermedad y economía, la necesidad de modelos consolidados económico-epidemiológicos es innegable.

El presente artículo, que aborda la construcción de un modelo DSGE-SIR que incorpore las complejas relaciones entre enfermedad, contención y dinámica económica, consta de cinco secciones además de esta: la sección segunda, que revisa lo que se ha trabajado en la literatura en cuanto a DSGE y modelos SIR, hasta llegar a los modelos que han intentado integrar ambos análisis; la tercera que analiza los mecanismos a través de los cuales se conectan los fenómenos económicos y los fenómenos epidemiológicos; la cuarta, que discute el tema de la calibración; la quinta, que presenta los resultados del modelo; y la sexta, que se ocupa de las conclusiones y recomendaciones de política, que permita atenuar el efecto tanto económico (medios de vida) como en las pérdidas humanas (vida).

## **1. Revisión de la literatura**

Los modelos dinámicos de equilibrio general estocástico (DSGE) se han convertido en un marco estándar para modelar en macroeconomía moderna. Basados en la teoría del crecimiento y del ciclo económico en la configuración del equilibrio general, se centran en comprender el proceso de toma de decisiones hogares e inversionistas para obtener la máxima utilidad y ganancia dadas las restricciones presupuestales que enfrentan.

En los últimos 15 años ha habido un progreso notable en la especificación y estimación de los DSGE (Tovar, 2009). Son herramientas poderosas que proporcionan un marco coherente para la política discusión y análisis. En principio, pueden ayudar a identificar las fuentes de las fluctuaciones, responder a las preguntas sobre los cambios estructurales, prever y predecir el efecto de la política y realizar experimentos contrafactuales (Jerger et al., 2019). También permiten establecer un vínculo entre las características estructurales de la economía y los parámetros de forma reducida, algo que no siempre fue posible con los modelos macroeconómicos a gran escala. No obstante, como cualquier otra herramienta, los modelos DSGE necesitan probar su capacidad de encajar los datos y confirman su utilidad como herramientas de política (Tovar, 2009). De hecho, sólo, después del trabajo de *Christiano et al.*

(2005), titulado *"Nominal Rigidities and the Dynamic Effects of a Shock to Monetary Policy"* se reunieron pruebas que demostraban que un modelo basado en la optimización con rigideces nominales y reales podría dar cuenta con éxito por los efectos de un choque de la política monetaria. Además, fue sólo hasta que el trabajo de Smets y Wouters (2003) que se demostró que los modelos keynesianos podían rastrear y pronosticar series de tiempo, como lo haría una auto regresión vectorial estimada con técnicas bayesianas (BVAR). A partir de estos trabajos seminales y por su versatilidad se han realizado distintas aplicaciones, por mencionar algunas, los que se refieren a choques y fricciones del ciclo económico para Estados Unidos (Smets y Wouters, 2007), factores financieros en los ciclos (Christiano et al, 2007), pronósticos macroeconómicos (Wickens, 2007), regulación macroprudencial y el Brexit (Jerger, 2019), entre muchos otros.

Lo que se refiere a modelos epidemiológicos, la mayor parte de los modelos matemáticos para la transmisión de enfermedades infecciosas descienden del modelo clásico de susceptibilidad-infección-remoción (SIR) de Kermack y McKendrick (1927), el trabajo seminal titulado *"Contribution to the mathematical theory of epidemics"*. Varios estudiosos investigan el comportamiento dinámico de diferentes modelos epidémicos y muchas de sus extensiones. En este sentido, desde un enfoque estocástico, encontramos el trabajo de Rao (2014), que presentan un modelo de epidemia SIR con perturbaciones estocásticas. El autor supone que las perturbaciones estocásticas son de un tipo de ruido blanco que es directamente proporcional a las distancias de tres variables desde los valores de estado estacionario, respectivamente. Al construir funciones adecuadas de Lyapunov, se obtienen algunas propiedades cualitativas, como la existencia de soluciones positivas globales, la limitación estocástica y la permanencia.

Lo que se refiere en la integración del mundo macro con el de los modelos SIR, hay unos pocos estudios de costos económicos de brotes a gran escala de enfermedades infecciosas a la fecha: Schoenbaum (1987) es un ejemplo de un análisis inicial del impacto económico de la gripe. Meltzer et al. (1999) examinan los posibles efectos económicos de la pandemia de gripe en los Estados Unidos y evaluar varias intervenciones basadas en vacunas.

No obstante, por la propagación del SARS-COV2 la literatura naciente ha aumentado considerablemente. Por mencionar los más relevantes se encuentra el libro titulado *"Economics in the Time of COVID-19"*, que contiene 14 capítulos que intenta abordar los impactos económicos a nivel mundial y en determinadas regiones del COVID-19, con algunos apartados

más dedicados a la epidemiología. Siguiendo esta línea se encuentra los trabajos de *Zhao et al.* (2020) para la economía China; el de *Fornaro & Wolf* (2020) con recomendaciones de política económica sobre un marco simple; el trabajo de *Anderson et al* (2020) para Japón; el de *Rodríguez et al* (2020) para una economía latinoamericana: Brasil, aunque desde un punto de vista más epidemiológico que económico; para Europa el estudio de *Johnson et al.* (2020), dónde estiman escenarios para su uso en preparación para una posible epidemia generalizada. Proponen acciones para prepararse para posibles fases de mitigación y coordinar esfuerzos para proteger la salud de los ciudadanos.

En este recuento de lo que se ha desarrollado en esta línea, cabe destacar un working paper de *McKibbin & Fernando* (2020), titulado "*The global macroeconomic impacts of COVID-19: Seven scenarios*", dónde aplican modelos CGE (Computable General Equilibrium) y DSGE, simulando siete escenarios con un modelo híbrido para 20 economías afectadas. Encuentran que los escenarios incluso un brote contenido podría impactar significativamente la economía global a corto plazo; el de *Acharya et al.*, (2020) que muestra estrategias de contención para minimizar los costos de la pandemia; el estudio de *Atkeson* (2020) presenta a los economistas un modelo SIR simple de la progresión de COVID-19 en los Estados Unidos durante los próximos 12-18 meses; el de *Jorda et al.* (2020) que analiza las consecuencia económicas de largo plazo; finalmente, uno de los trabajos que están llamando mucho la atención es el de *Eichenbaum, Rebelo & Trabandt* (2020), titulado "*The Macroeconomics of Epidemics*", en el cual extienden el modelo de epidemiología canónica para estudiar la interacción entre las decisiones económicas y las epidemias. Encuentran mediante un modelo DSGE sencillo con un módulo SIR que, ante el escenario de referencia, la política de contención óptima aumenta la severidad de la recesión, pero salva aproximadamente medio millón de vidas en los Estados Unidos. Cabe agregar como bien lo describe *Baldwin & Di Mauro* (2020), que los gobiernos y las organizaciones internacionales han estado avizorando una pandemia mundial durante años, no obstante, los efectos económicos del shock han sido mucho menos estudiados. Por ello, muchos gobiernos del mundo han actuado en un fenómeno sin precedentes a nivel mundial, cerrando y paralizando la economía con el fin de minimizar a lo máximo posible las pérdidas humanas.

Pero ya nadie duda de la seriedad con que debe enfrentarse la pandemia, y por consiguiente, del cambio inminente que deben producirse en las políticas económicas a nivel mundial. Los principales economistas de todo el mundo están pidiendo una acción política rápida para

mitigar el daño económico de la pandemia global. En este sentido, ha salido un segundo libro electrónico sobre el COVID de los mismos editores *Baldwin & Di Mauro* (2020) titulado **"Mitigating the COVID Economic Crisis: Act Fast and Do Whatever It Takes"** dónde los expertos son unánimes en concluir que un fuerte estímulo fiscal coordinado es imperativo.

Para Colombia se han desarrollado diferentes estudios que enmarcan la evolución de la aplicación de modelos de equilibrio general dinámico y estocástico (DSGE por sus siglas en inglés), al análisis de los agregados macroeconómicos, buscando comprender las fluctuaciones del ciclo económico para ayudar a la toma de decisiones tanto de política fiscal como de política monetaria.

Uno de los estudios de mayor referencia que contempla la idea de una aplicación de la teoría detrás de los modelos RBC y DSGE, es el realizado por *Hamman y Riascos* (1998), quienes abren las puertas de estos modelos para economías pequeñas y abiertas como Colombia. Actualmente el Banco de la República desarrolla y emplea un modelo DSGE, llamado "Policy Analysis Tool Applied to Colombian Needs" (PATACON) para realizar proyecciones e implementar la política monetaria, basado en los trabajos de *Christiano, Eichenbaum and Evans* (2005) y de *González, Mahadeva, Prada & Rodríguez* (2011), para una economía pequeña y abierta, donde el gobierno tiene un papel importante implementando la política fiscal.

Los modelos DSGE en Colombia se han usado para entender distintas problemáticas de la economía, como las rigidices nominales y reales (*Bonaldi*, 2010); el estándar de funcionamiento de la economía (*Revillas*, 2011); los choques exógenos y de política fiscal (*Botero, Franco & Hurtado*, 2013); evaluación de la Regla Fiscal (*Torres*, 2012). Sobre política económica se cuenta dos trabajos relevantes: el de *Botero, Franco & Hurtado* (2012) y el de *Suescún & Steiner* (2017); y sobre política monetaria no convencional de *Botero & Rendón* (2015). Ahora bien, el reto consiste en adaptar los modelos DSGE a la propagación del virus y sus efectos dinámicos. Para tal fin, se consideran dos tipos de consumidores en el hogar representativo, en un intento de empalme del modelo DSGE y SIR para el análisis del COVID-19 en la economía. La novedad distintiva de nuestro modelo DSGE radica en la inclusión de un módulo especial que modela la transición entre salud y enfermedad, mediante un proceso de Markov, lo que permita conocer la dinámica de las variables relacionadas con el consumo y con la oferta de trabajo, en un modelo de frecuencia semanal.



## 2. Los mecanismos de transmisión

La pandemia se extiende progresivamente en una población, a través de procesos de contagio que se representan de manera típica mediante modelos SIR<sup>4</sup>. En ellos se aborda generalmente el contagio como un matching entre población susceptible y población infectada, cuya efectividad depende de parámetros técnicos asociados a la tasa de contagio ( $R_0$ ), al tiempo de incubación de la enfermedad y al tiempo de infección. Los modelos incorporan generalmente dos desenlaces, la recuperación, generalmente asociada a un alto grado de inmunidad futura, y la muerte, que depende de la tasa de letalidad de la enfermedad.

Pero al tiempo que se extiende, la pandemia produce efectos disruptivos sobre la actividad económica, que pueden clasificarse en tres grandes categorías:

Desplazamientos de la demanda de consumo, que se ajusta hacia al alza en algunos consumos que pudieran considerarse precautelativos, o a la baja en todos los demás rubros ajustables de la conducta de los consumidores, con un efecto neto total probablemente negativo.

Desplazamientos en la oferta de trabajo, por la incapacidad de trabajar o por precauciones ante el contagio que toman algunas personas, evitando en algún grado la exposición al riesgo.

Y reducciones transitorias de la oferta de bienes y servicios (lo que los economistas denominamos un shock de oferta), bien sea por los ajustes indispensables de jornadas o hábitos de trabajo, por las medidas de seguridad que se adoptan para preservar la seguridad de las personas o por medidas precautelativas que se toman ante la expectativa de agudas reducciones en la demanda de aquellos bienes o servicios que pueden considerarse vulnerables en un escenario de expansión de la enfermedad.

Ante la pandemia, los gobiernos se ven abocados a implementar acciones de contención, que se expresan generalmente en medidas de distanciamiento social. Esas medidas buscan, de una parte, ralentizar los contactos sociales y, de otra, proteger a grupos de población especialmente vulnerables desde el punto de vista de la enfermedad. El propósito de esas medidas es triple: de una parte, evitar que la infección desborde la capacidad de atención hospitalaria de la que dispone el país; pero también, reducir la tasa de contagio; y hacer mínimos los desenlaces fatales, decrementando la tasa de letalidad. La reducción de la tasa de contagio se logra por dos

---

<sup>4</sup> Susceptibles, Infectado y Recuperados. Originalmente formulado por Kermack and McKendrick (1927)

vías: Por la disminución de contactos interpersonales y de la probabilidad de contagio; y por la reducción de tiempos de latencia de la enfermedad, procurando que la detección temprana permita aislar el paciente y neutralizar su capacidad de contagio.

Pero, así como el distanciamiento reduce las oportunidades de contagio, reduce también las oportunidades de consumo y de trabajo. En este sentido, opera como un racionamiento, que limita el consumo al que puede acceder el sujeto y las oportunidades de trabajo que puede aprovechar. Y por supuesto, refuerza del shock de oferta que sufre el sector productivo, porque impone condicionamientos adicionales a la actividad productiva, y fractura cadenas productivas, haciendo relevantes restricciones y cuellos de botella.

Así, el efecto esperado de las medidas de contención es profundamente disruptivo desde el punto de vista económico, pero en la medida en que disminuya el contagio y reduzca la letalidad, es también el camino más corto a la recuperación futura.

El modelo DSGE-SIR complementa el modelo DSGE convencional, que incorpora hogares, empresas, inversionistas y gobierno, de una economía abierta y pequeña, con un módulo SIR y un módulo de interacciones económico-epidemiológicas<sup>5</sup>. El módulo SIR opera como un proceso de Markov, mediante una matriz de transición entre estados de salud, con coeficientes variables, para reflejar el proceso del contagio. La matriz de transición se calibra para dos estados (sanos y enfermos), y tiene la forma:

$$\begin{bmatrix} 1 - tc_t & tc_t \\ tr_t & 1 - tr_t \end{bmatrix}$$

En el estado estacionario (con una porción constante de la población enferma o incapacitada), los coeficientes de la matriz son constantes. Pero una vez que se desata la pandemia,  $tc_t$  se endogeniza para reflejar, de una parte, el proceso de infección, y de otra, el impacto de la política de distanciamiento que eventualmente implemente el gobierno, en un esquema de modelación SIR convencional:

$$tc_t = atc_t s s a n_{t-1} s e n f_{t-1} i d i s t_t^\eta$$

Donde  $atc_t$  es el factor de contagio (el factor  $\beta$  de los modelos SIR, dependiente de la inversa del tiempo de infección y de la tasa  $R_0$  de contagio),  $s s a n$  y  $s e n f$  son, respectivamente, los

---

<sup>5</sup> En el anexo matemático se describen en detalle las ecuaciones del modelo.

porcentajes de población aliviada y enferma,  $idist$  el índice de distanciamiento (que se explica a continuación) y  $\eta$  su efectividad.

El índice  $idist$  refleja el hecho de que el gobierno puede responder al contagio con medidas de distanciamiento social. Dicho índice vale 1, en el estado estacionario, porque no hay restricciones al contacto humano, y disminuye de valor, para expresar la reducción de contactos sociales y de contagios que la respuesta del gobierno genera. En el modelo, se endogeniza la respuesta, a través de un índice ( $rpp$ ), que es una variable de decisión del gobierno, y que es mayor, cuanto mayor distanciamiento se quiere imponer, afectando tanto la tasa de contagio, como el consumo, la oferta de trabajo y la capacidad productiva.

El modelo DSGE convencional, por su parte, supone un continuum de hogares, indexados entre 0 y 1, que deciden su consumo y su oferta de trabajo óptimos. Los hogares están compuestos, en el estado estacionario en el que se calibra el modelo, por dos tipos de miembros: enfermos y aliviados, cada uno de ellos con un coeficiente de consumo y de trabajo diferencial.

En concreto, se asume que un aliviado consume 1.2 veces lo que consume un enfermo y trabaja 4 veces lo que trabaja un enfermo. La calibración determina la mezcla inicial de enfermos y aliviados, y los factores específicos de consumo y trabajo que permiten indexar el consumo del hogar sobre bases unitaria, para facilitar la construcción de los flujos consistentes de ingreso entre los hogares:

$$c_t = ipsic_t c_t^*$$

$$n_t = ipsin_t n_t^*$$

$$ipsic_t = racc_t (ssan_t csan + senf_t cenf)$$

$$ipsin_t = racn_t (ssan_t nsan + senf_t nenf)$$

Siendo:

$c_t^*$ ,  $c_t$ ,  $n_t^*$ ,  $n_t$  son los consumos y trabajos óptimos y efectivos;  $ipsic_t$  y  $ipsin_t$ , los índices de consumo y de trabajo familiar, resultantes de la ponderación entre población sana y enferma ( $ssan_t$ ,  $ssan_t$ ), dados sus niveles de consumo y trabajo ( $csan$ ,  $cenf$ ,  $nsan$  y  $nenf$ ) y  $racc_t$ ,  $racn_t$  son índices de racionamiento que el gobierno puede inducir a través del programa de contención y distanciamiento.

Cuando se produce el shock del COVID-19, modelado como un aumento de la tasa de contagio de la población, cambia la proporción entre enfermos y aliviados conforme avanza la enfermedad, y caen el consumo y el trabajo, reflejando ese cambio en la composición. Literalmente, la población cambia su patrón de consumo y sus hábitos de trabajo, induciendo shocks negativos de demanda y de oferta de trabajo.

Las empresas operan en competencia monopolística, y están sujetas a inflexibilidades en la fijación de precios, que se modelan a la Calvo. Su función de producción incorpora dos factores productivos (trabajo y capital) y un indicador de productividad (la productividad total de los factores, en la jerga de los economistas), que sufre también shocks, asociados tanto a las interrupciones causadas por la enfermedad, como a las medidas de contención que implementa el gobierno. Así, el shock que experimenta la productividad tiene la forma:

$$e_z = e_0 e_{atc}^{\eta_{atc}} e_{idist}^{\eta_{idist}}$$

Donde el shock de productividad ( $e_z$ ) es sensible al shock de contagio ( $e_{atc}$ ) y al shock del distanciamiento social  $e_{idist}$ .

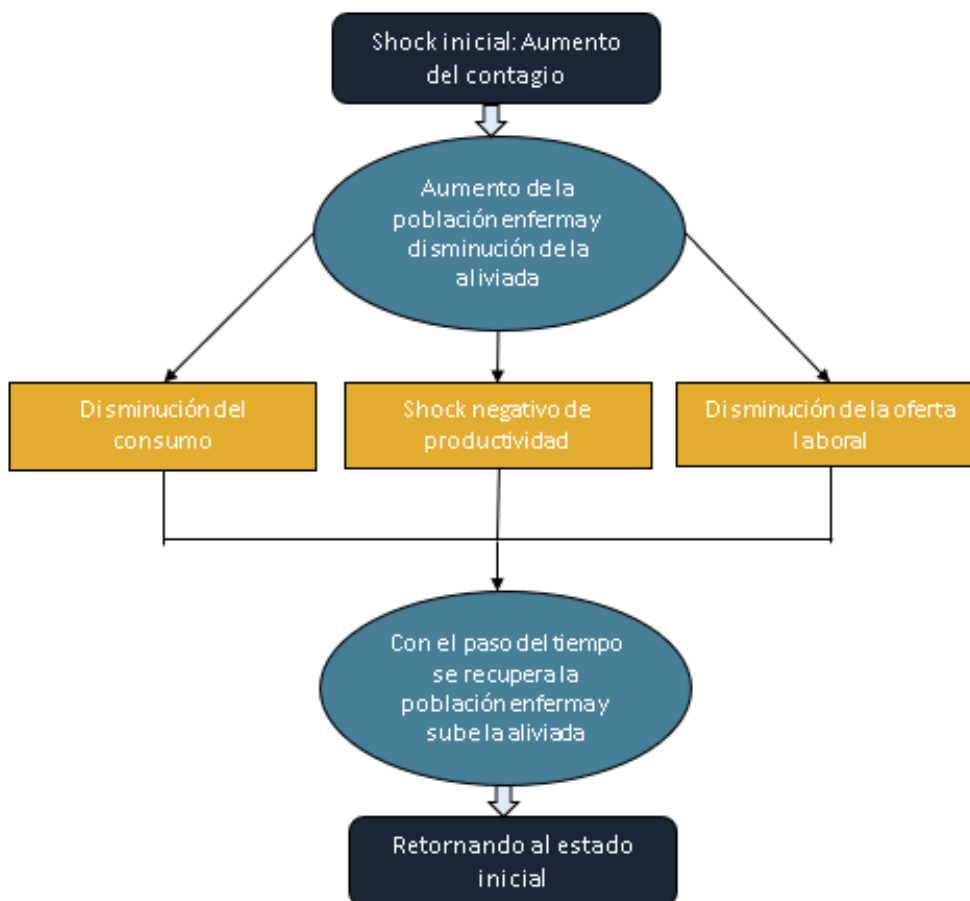
La sensibilidad se calibra mediante parámetros de elasticidad, y como es habitual en los modelos, tienen una persistencia, que depende del parámetro  $\rho$  del proceso autorregresivo.

En resumen, se presenta un shock inicial de aumento de contagios, que incrementa la población enferma y disminuye la población aliviadas. Su efecto endógeno se explica por tres mecanismos: la disminución del consumo, un shock negativo en la productividad y una disminución de la oferta laboral.

Ahora bien, es un proceso que, tras una fase de escalamiento, tiende a extinguirse, dada la probable forma funcional que lo modela, y que depende del producto entre la población aliviada susceptible de enfermarse y la población enferma. Conforme va creciendo la población enferma a costa de la aliviada, el impacto marginal de los enfermos es mayor hasta que llega un punto en que se revierte la curva, cuando la disminución de la población susceptible, debido a la inmunidad adquirida por quienes se recuperan de la enfermedad, no es compensada por el incremento de la población enferma. Ello se refleja en el modelo como un shock temporal en el proceso autorregresivo que define la tasa de contagio.

El escenario básico de pandemia, sin contención, se refleja en la Figura 1.

Figura 1: Diagrama del escenario base de la pandemia sin contención

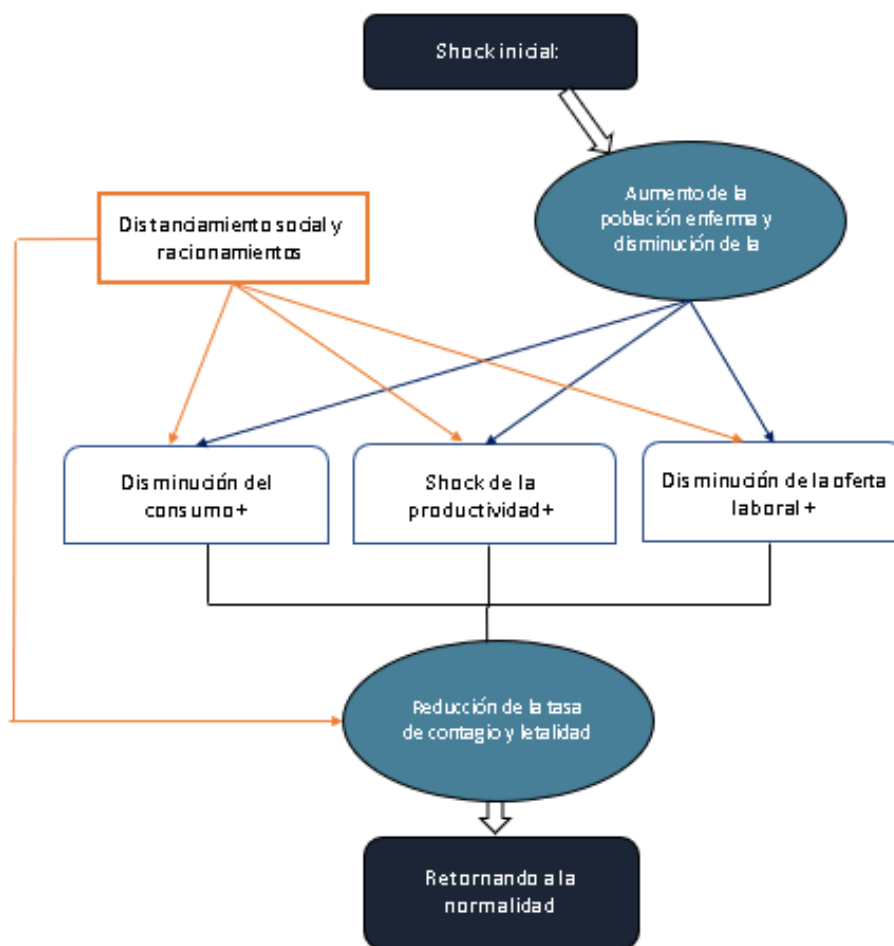


**Fuente:** Elaboración de los autores.

Las respuestas de política pública incluyen generalmente medidas de distanciamiento, que buscan reducir la tasa de contagio y limitar la letalidad de la enfermedad. Esas medidas refuerzan, sin embargo, el efecto de la enfermedad sobre el consumo, por efectos del racionamiento que implican; sobre la oferta de trabajo, así mismo racionada por las limitaciones de movilidad; y sobre la producción, por restricciones de operación que profundizan el shock de productividad experimentado por las empresas.

Pero si las medidas tienen una duración adecuada y son efectivas en el propósito de disminuir el contagio y la letalidad, deben permitir una recuperación más rápida de la actividad económica, moderando los efectos de la enfermedad sobre la capacidad productiva de la sociedad, como lo ilustra la Figura 2.

Figura 2: Diagrama del escenario alternativo de contención y distanciamiento



Fuente: Elaboración de los autores.

### 3. Calibración del modelo

Esta sección presenta el conjunto de supuestos que sustentan el funcionamiento del modelo. La calibración de los DSGE se fundamenta en la determinación de los valores de estado estacionario de las variables sobre el que se estructura y, de los parámetros que lo permiten replicar el funcionamiento de la economía en su nivel de largo plazo.

En este orden de ideas, el modelo descrito en este trabajo se ha calibrado con información del 2018, último año para que hay disponible información completa de Cuentas Nacionales, y que en términos generales podría considerarse representativo del comportamiento de la economía colombiana. Durante este periodo, el crecimiento de la economía medido por la variación

porcentual anual del PIB fue del 2,6% (cerca a su nivel de crecimiento potencial<sup>6</sup>). La tasa de inflación se ubicó en 3,18%; es decir, 82 puntos básicos por debajo del rango meta superior establecido por el Banco de la República (4%). Por otra parte, el tipo de cambio nominal se ubicó, en promedio, alrededor de \$2.956,4 pesos colombianos por dólar americano.

Respecto a la información estadística necesaria para establecer la parametrización del modelo y los valores iniciales de sus variables, ésta proviene de las series de cuentas nacionales, de la gran encuesta integrada de hogares (GEIH) y del índice de precios al consumidor (IPC) elaboradas por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE); de la balanza de pagos, los agregados monetarios, la tasa representativa de mercado (TRM) y las tasas de interés de captación y colocación suministradas por el Banco de la República; de los saldos de la deuda total del gobierno general provenientes del Ministerio de Hacienda y Crédito Público; y finalmente, de las series de tasas de interés e indicadores de riesgo internacionales, disponibles en la página del Banco Central de Reserva del Perú.

Con lo anterior, la parametrización de las funciones del modelo que permite replicar la economía en su estado estacionario para el año de referencia se lleva a cabo mediante la construcción de una matriz de contabilidad social (SAM, por sus siglas en inglés) simplificada, que simula el flujo circular de la economía y es consistente con la conducta que siguen los distintos agentes involucrados en el modelo. De esta forma, las empresas remuneran al capital y al trabajo como factores productivos, pagan impuestos y aranceles, y transfieren al resto del mundo el valor de la mercancía importada. Los hogares pagan a las empresas el valor de lo que consumen, transfieren impuestos al gobierno y ahorran un monto proporcional de su ingreso. El gobierno también consume productos de las empresas, invierte y transfiere al exterior pagos por concepto de intereses a la deuda externa. Finalmente, el resto del mundo paga a las empresas el valor de lo que exportan y transfiere remesas a los hogares.

Por su parte, la calibración del módulo epidemiológico se basa en el proceso convencional de calibración de los modelos SIR con el fin de establecer los parámetros que regirán la evolución de la pandemia en la dinámica del modelo. Basado en ello, se construye un proceso Markoviano dinámico (coeficientes variables) que permite simular las transiciones entre los dos estados de

---

<sup>6</sup> El crecimiento del PIB potencial para 2018 fue de 2.9%, según cálculos propios mediante la metodología de función de producción con capital humano.

salud contemplados en este trabajo: sanos y enfermos. Además, cabe resaltar que frente a la exigencia de los modelos DSGE de que las variables presenten un valor de estado estacionario, la tasa de contagio  $tc$  se calcula a partir del promedio de las tasas relacionadas a un conjunto de enfermedades análogas.

Por otra parte, si bien lo habitual en este tipo de modelos es que la calibración corresponda a una temporalidad anual o trimestral congruente con la periodicidad de medición de los principales agregados macroeconómicos, este trabajo optó por hacerla de forma semanal. Lo anterior, con el propósito de definir un punto de acuerdo entre los modelos epidemiológicos, cuya ventana temporal suele ser diaria, y los modelos macroeconómicos, sin dejar que la información de estos últimos pierda significancia. Para esto, se llevó a cabo un proceso de transformación de las bases de datos para encontrar sus valores semanales promedio.

En este orden de ideas, la calibración de los parámetros resultante del tratamiento de la matriz SAM junto con información de otras variables macroeconómicas y epidemiológicas relacionadas con el Covid-19 se resume en la tabla 1.

**Tabla 1: Parámetros esenciales del modelo**

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Descripción</b>
<i>csan</i>	1,003	Índice de consumo de población sana
<i>cenf</i>	0,836	Índice de consumo de población enferma
<i>nsan</i>	1,017	Índice de trabajo de población sana
<i>nenf</i>	0,254	Índice de trabajo de población enferma.
<i>eracc</i>	0,5	Elasticidad del racionamiento de consumo al índice de distanciamiento
<i>eracn</i>	1,1	Elasticidad del racionamiento del trabajo al índice de distanciamiento
<i>etcd</i>	0,5	Elasticidad de la tasa de contagio al índice de distanciamiento
<i>etfpatc</i>	0,2	Elasticidad del shock de productividad al shock de contagio
<i>etfpidist</i>	0,2	Elasticidad del shock de productividad al shock de distanciamiento



Parámetro	Valor	Descripción
$rpp$	0,5	Elasticidad del índice de distanciamiento al factor de contagio
$\beta$	0,99	Tasa subjetiva de descuento
$\theta$	1,0002	Tasa bruta de crecimiento poblacional
$\delta$	0,998	Tasa bruta de depreciación
$\alpha$	0,339	Participación del stock de capital en la producción
$\gamma$	2,973	Constante del costo de ajuste del capital

**Fuente:** Elaboración de los autores.

Ahora bien, la persistencia temporal de los choques exógenos que se simulan es determinada por los coeficientes  $\rho$  de los procesos autorregresivos que siguen las variables que se consideran exógenas, o en el caso de este modelo, parcialmente exógenas<sup>7</sup>. Por tal motivo, puesto que uno de los principales objetivos de este estudio es evaluar los efectos agregados de la pandemia sobre el nivel de actividad económica bajo los escenarios sin y con política de intervención (distanciamiento social), a continuación, se presenta la calibración que se emplea para los coeficientes de persistencia de las variables sobre las que la política de contención incide directamente. La idea en los coeficientes es la siguiente: un shock cuya persistencia está definida por  $\rho = 0,9$ , tarda 28 semanas en desaparecer<sup>8</sup>. Un  $\rho = 0,83$  acorta este tiempo a 16 semanas. A su vez, un  $\rho = 0,7$  demora 9 semanas. Por último, un  $\rho = 0,6$  dura, en cambio, 6 semanas, con ese mismo criterio. Así, el shock original es un shock que podría mantener su efecto por algo más de medio año; el distanciamiento modelado operaría durante 8 y 16 semanas, y reduciría el tiempo de mayor incidencia de la pandemia a 6 semanas, en tanto que el shock promedio de productividad con distanciamiento, se reduciría en promedio de 9 a 6 semanas dependiendo de la severidad del distanciamiento.

<sup>7</sup> Variables como la productividad  $z$  tienen un componente exógeno determinado por su término de error idiosincrático y un componente endógeno relacionado a la perturbación que se efectúa sobre el factor de contagio *atc*.

<sup>8</sup> Entendiendo desaparecer como llegar a un valor inferior al 5%, es decir,  $\rho^n = 0,05$ .

Tabla 2: Coeficientes procesos autorregresivos

Parámetro	Valor			Descripción
	Sin contención	Contención (8 semanas)	Contención (16 semanas)	
$\rho_1$	0,9	0,62	0,72	Persistencia del shock negativo de la productividad $z$
$\rho_{18}$	0,9	0,62	0,62	Persistencia del shock positivo del factor de contagio $atc$
$\rho_{19}$	n.a.	0,7	0,83	Persistencia del índice de distanciamiento $idist$
$\rho_{20}$	0,9	0,62	0,72	Persistencia del racionamiento del consumo $racc$
$\rho_{21}$	0,9	0,62	0,72	Persistencia del racionamiento del trabajo $racn$

Fuente: Elaboración de los autores.

Finalmente, el nivel de estado estacionario de las variables macroeconómicas (expresadas en miles de millones de pesos per cápita semanales) y epidemiológicas que resultan de su respectiva calibración, manteniendo consistencia con el sistema de ecuaciones del modelo, se especifica en la tabla 3.

Tabla 3: Estado estacionario de las variables relevantes del modelo en estado estacionario.

Variable	Valor	Descripción
$ssan$	0,977	Participación de la población sana
$senf$	0,023	Participación de la población enferma
$tc$	0,021	Tasa de contagio
$tr$	0,94	Tasa de recuperación
$atc$	0,983	Constante en la función de contagio
$idist$	1	Índice de distanciamiento social inicial (donde 1 significa que no hay distanciamiento)
$racc$	1	Índice de racionamiento del consumo inicial (donde 1 significa que no hay racionamiento)

<b>Variable</b>	<b>Valor</b>	<b>Descripción</b>
<i>racn</i>	1	Índice de racionamiento del trabajo inicial (donde 1 significa que no hay racionamiento)
<i>ipsic</i>	1	Factor de ponderación del consumo en el estado inicial
<i>ipsin</i>	1	Factor de ponderación del trabajo en el estado inicial
<i>c</i>	0,266	Consumo per cápita.
<i>n</i>	0,464	Trabajo como índice de ocupación.
<i>i</i>	0,076	Inversión per cápita
<i>k</i>	44,398	Stock de capital per cápita
<i>r</i>	0,002	Tasa de remuneración del capital
<i>x</i>	0,062	Exportaciones per cápita
<i>m</i>	0,082	Importaciones per cápita
<i>s</i>	0,7	Saldo deuda pública per cápita
<i>pib</i>	0,391	Producto Interno Bruto per cápita
<i>τh</i>	0,014	Tasa de impuesto a los hogares
<i>z</i>	0,061	Productividad

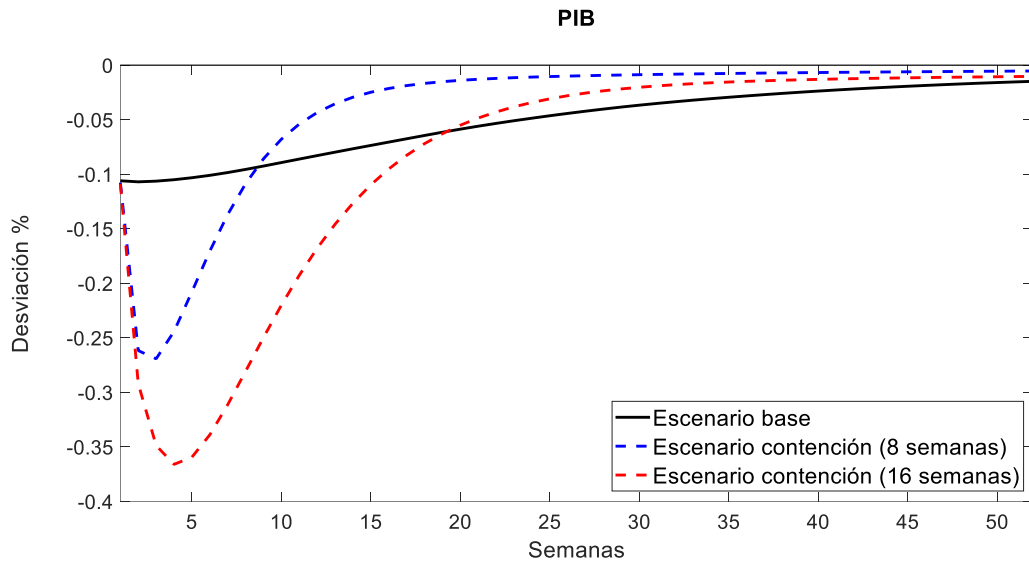
**Fuente:** Elaboración de los autores.

#### **4. Resultados**

El modelo simula tres escenarios: un escenario base, de pandemia sin contención; un escenario de contención con medidas de distanciamiento de duración media (que se va moderando en un horizonte de hasta 8 semanas) y un escenario contención con medidas de distanciamiento con duración prolongada (que duplica la duración adicional, hasta 16 semanas).

La pandemia genera, en el escenario básico, una caída del PIB sostenida en el tiempo, que se prolonga hasta el horizonte de proyección, en este caso, 40 semanas. Las medidas de contención, en el escenario de duración moderada del distanciamiento, agudizan inicialmente la caída del PIB, pero a partir del tercer mes, atenúan el efecto de la crisis, produciendo un efecto neto positivo de reducción del 15% en el impacto negativo de la crisis en el producto. En la prolongación del período de distanciamiento, en cambio, los efectos positivos tardan mucho más en aparecer, y no compensarían la caída. Por el contrario, la agudizarían, casi duplicando su efecto.

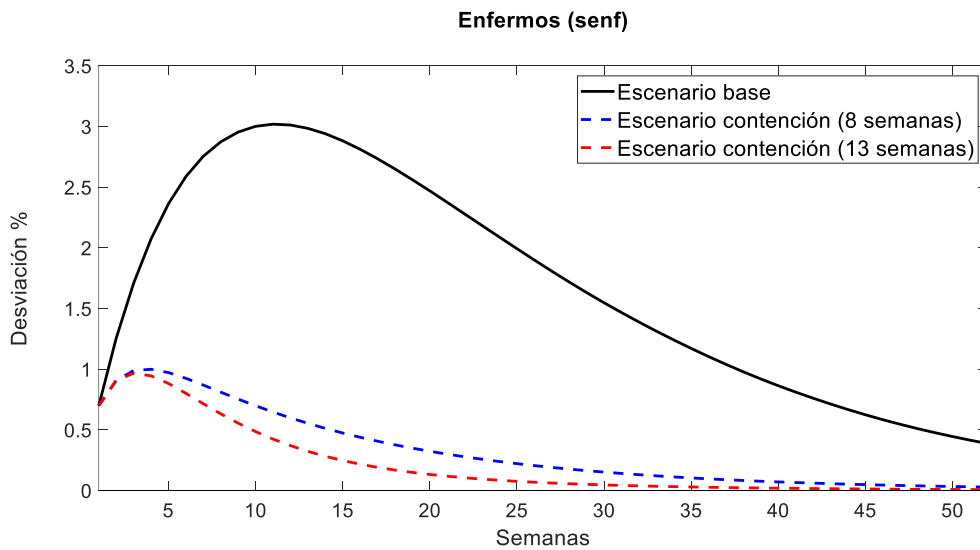
**Figura 3: Respuesta del PIB al choque de la pandemia**



**Fuente:** Simulación Dynare.

Ahora bien: los beneficios de prolongar el distanciamiento son marginales, desde el punto de vista de la salud: el distanciamiento reduce el máximo nivel de contagio en un 68%, pero la prolongación de su duración sólo contribuye con un 1% adicional a esa reducción.

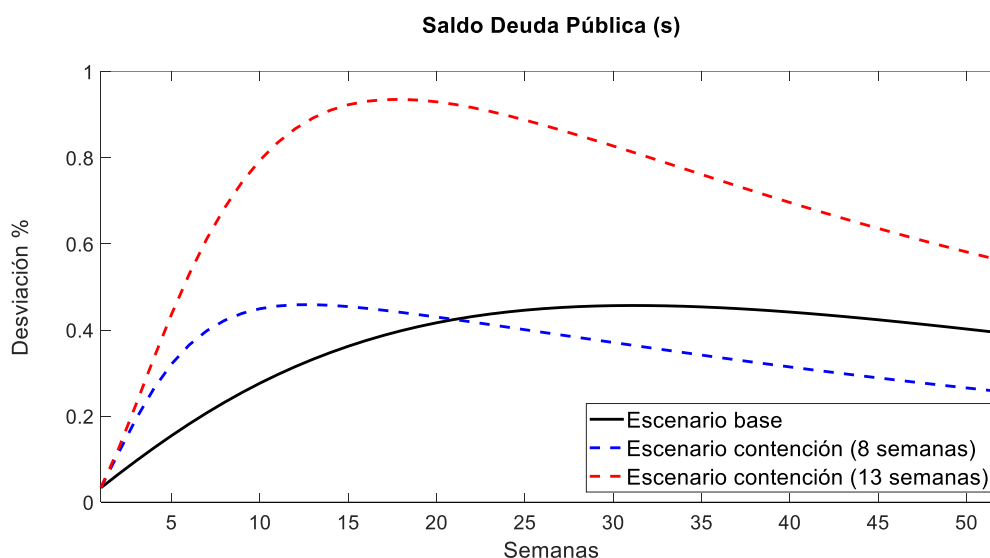
**Figura 4: Respuesta porcentaje de enfermos ante choque de la pandemia**



**Fuente:** Simulación Dynare.

Las políticas de distanciamiento afectan también las finanzas públicas, incluso sin considerar las medidas de mitigación que implican. El modelo calcula la senda de endeudamiento que resulta de la reducción de ingresos que se genera por la caída del nivel de actividad económica. En el caso del primer escenario de distanciamiento, los efectos iniciales de la pandemia sobre las finanzas públicas se agudizan, pero no son, en el horizonte de la proyección, mayores a los que se generarían por la propia pandemia. Pero prolongar el distanciamiento podría tener efectos muy severos sobre el endeudamiento público, reduciendo considerablemente la capacidad del estado para implementar las necesarias medidas de mitigación que deben aplicarse, dado el tremendo impacto que la pandemia tendrá sobre el empleo, y que se señala presenta más adelante.

**Figura 5: Respuesta del saldo de deuda al choque de la pandemia**



Ahora bien: los shocks simulados con el modelo son marginales (representan un cambio del 1% en la tasa de contagio). Para determinar el impacto total de la pandemia, es necesario cuantificar la magnitud del shock efectivamente experimentado, y escalar los efectos totales que el modelo arroja. Asumiendo un  $R_0$  de 2,5, un tiempo de incubación de la enfermedad de 9 días, y un tiempo de infección de 5 días<sup>9</sup>, los cálculos llevarían a una caída del PIB en el escenario base del 3,2%, que se moderaría en el escenario de contención al 2,7%, pero podría profundizarse

<sup>9</sup> Estos supuestos son un poco menos pesimistas que los asumidos por González (2020) en un informe especial reciente, en el que supone período de incubación de 5,2 días, período de infección de 15 días y un  $R_0$  de 2,5. De acuerdo esos supuestos, el porcentaje máximo de población contagiada sería del 16,5%. Con los supuestos empleados en este informe, en cambio, ese porcentaje sería el 8,4%.

hasta el 5,7%, de prolongar las medidas de distanciamiento según el segundo escenario de contención. El empleo, por su parte, se vería considerablemente afectado: en promedio, 793 mil personas perderían su empleo, con un pico máximo del orden de 1,2 millones, en el momento más crítico de la crisis. Las medidas de contención agudizan inicialmente el desempleo efectivo, porque el distanciamiento implica que muchas personas no trabajan, llevando la cifra a 4 millones de personas sin trabajo efectivo. Pero la recuperación lleva a que, al final de la proyección, el efecto total sobre el empleo se modere significativamente, dejando sólo 79 mil pérdidas permanentes de empleo. Por supuesto, lo que estas cifras indican es que el gobierno debe atender a esos 4 millones de personas, brindándole medios de vida, para superar la crisis. Ello da idea de la magnitud del esfuerzo asistencialista que el gobierno deberá emprender para mitigar los efectos de la crisis: La tabla 4 resume los efectos mencionados.

**Tabla 4. Impactos totales**

<b>VARIABLE</b>	<b>Escenario base</b>	<b>Contención básica</b>	<b>Contención prolongada</b>
Crecimiento del PIB, horizonte de la proyección	-3,22%	-2,73%	-5,75%
Pérdida promedio de empleos en el horizonte de la proyección. Miles de personas.	793,1	809,1	1.813,7
Máximo nivel de pérdida de empleos. Miles de personas	1.171,4	4.067,0	5.989,3
Pérdida de empleos por la pandemia (final del año). Miles de personas	319,5	79,2	162,1
Máximo nivel de infección. Miles de personas	8,4%	2,7%	2,6%

**Fuente:** Cálculos propios

## **5. Conclusiones**

Las medidas de distanciamiento social son, sin duda, necesarias para contener el contagio. Pero sus efectos negativos sobre la actividad económica son intensos y crecientes: su prolongación agrava la situación de los grupos sociales más vulnerables, que derivan su sustento de actividades informales, y pone en riesgo el aparato productivo, propiciando quiebras y dislocaciones profundas de las cadenas productivas. Ello, por supuesto, genera retos inmensos a la administración pública, que deberá sopesar adecuadamente beneficios y costos, y velar por que aquellos grupos sociales vulnerables, cuya voz es exigua, no experimenten un sufrimiento desmedido.

Se trata pues de imponer medidas de distanciamiento efectivas, que reduzcan el contagio, pero que, en la medida de lo posible, no lesionen de manera grave la actividad productiva, concentrando los esfuerzos en medidas restrictivas de contactos sociales no productivos. Y por supuesto, implementando protocolos rigurosos, que garanticen una oportuna detección de riesgos y una muy baja exposición al contacto en las actividades productivas. El objetivo es mitigar los costos futuros que la sociedad tenga que pagar por efecto de la destrucción de su capacidad de generar riqueza y bienestar, concentrando la atención en medidas inteligentes de distanciamiento y de detección temprana, que permitan contener el contagio de manera eficiente.

## Referencias

Acharya, K. P. (2020). Resource poor countries ought to focus on early detection and containment of novel corona virus at the point of entry. *Clinical Epidemiology and Global Health*.

Anderson, R. M., Heesterbeek, H., Klinkenberg, D., & Hollingsworth, T. D. (2020). How will country-based mitigation measures influence the course of the COVID-19 epidemic?. *The Lancet*.

Atkeson, A. (2020). What Will be the Economic Impact of COVID-19 in the US? Rough Estimates of Disease Scenarios (No. 595). Federal Reserve Bank of Minneapolis.

Baldwin, R., & di Mauro, B. W. (2020). Mitigating the COVID economic crisis: Act fast and do whatever it takes. *VoxEu.org*, CEPR.

Baldwin, R., & di Mauro, B. W. (2020). Economics in the Time of COVID-19.

Baldwin, R. (2020). Keeping the lights on: Economic medicine for a medical shock. *Macroeconomics*, 20, 20.

Bandyopadhyay, S (2020). Coronavirus Disease 2019 (COVID-19): we shall overcome. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 1.

Boldog, P., Tekeli, T., Vizi, Z., Dénes, A., Bartha, F. A., & Röst, G. (2020). Risk assessment of novel coronavirus COVID-19 outbreaks outside China. *Journal of clinical medicine*, 9(2), 571.

Bonaldi, P., González, A., & Rodríguez, D. (2010). Importancia de las rigideces nominales y reales en Colombia: un enfoque de equilibrio general dinámico y estocástico. *Formación de precios y salarios en Colombia*, 71.

Botero, J., Franco, H., Hurtado, Á., & Mesa, M. (2013). Choques exógenos y política fiscal en un modelo de equilibrio general dinámico estocástico (DSGE): una aplicación para economía emergente. *Revista de economía del Rosario*, 16(1), 1-24.

Botero, J., Franco, H., Rendón, Á. H., & Mesa, M. (2012). UNA APLICACIÓN DE UN MODELO NEOCLÁSICO DSGE CON POLÍTICA FISCAL. *Universidad EAFIT*.

Botero, J. A., & Rendón González, N. (2015). Conventional and non-conventional monetary policy: A dynamic stochastic general equilibrium model for Colombia. *Ensayos sobre POLÍTICA ECONÓMICA*, 33(SPE76), 4-17.

Botero, J. & Montañez, D. (2020). Efectos en la economía colombiana del COVID-19: Un análisis de equilibrio general computable. *Informe especial del grupo de coyuntura económica de la Universidad EAFIT*.

Christiano, L. J., Eichenbaum, M., & Evans, C. L. (2005). Nominal rigidities and the dynamic effects of a shock to monetary policy. *Journal of political Economy*, 113(1), 1-45.



- Christiano, L., Motto, R., & Rostagno, M. (2007). Financial factors in business cycles.
- Eichenbaum, M. S., Rebelo, S., & Trabandt, M. (2020). *The macroeconomics of epidemics* (No. w26882). National Bureau of Economic Research.
- Fernandes, N. (2020). Economic effects of coronavirus outbreak (COVID-19) on the world economy. Available at SSRN 3557504.
- Fornaro, L., & Wolf, M. (2020). Covid-19 Coronavirus and Macroeconomic Policy: Some Analytical Notes. Working Paper.
- Jandrić, P. (2020). Postdigital Research in the Time of Covid-19. *Postdigital Science and Education*, 1-6.
- Jerger, J., & Körner, J. (2019). Brexit and macroprudential regulation: a DSGE perspective. *International Economics and Economic Policy*, 16(1), 51-64.
- Johnson, H. C., Gossner, C. M., Colzani, E., Kinsman, J., Alexakis, L., Beauté, J. & Ekdahl, K. (2020). Potential scenarios for the progression of a COVID-19 epidemic in the European Union and the European Economic Area, March 2020. *Eurosurveillance*, 25(9).
- Jorda, O., Singh, S. R., & Taylor, A. M. (2020). *Longer-run economic consequences of pandemics* (No. w26934). National Bureau of Economic Research.
- Kermack, W. O., & McKendrick, A. G. (1927). A contribution to the mathematical theory of epidemics. *Proceedings of the royal society of london. Series A, Containing papers of a mathematical and physical character*, 115(772), 700-721.
- McKibbin, W. J., & Fernando, R. (2020). The global macroeconomic impacts of COVID-19: Seven scenarios.
- Rao, F. (2014). Dynamics analysis of a stochastic SIR epidemic model. In *Abstract and applied analysis* (Vol. 2014). Hindawi.
- Revilla, R. R. (2011). Modelos de equilibrio general dinámicos y estocásticos para Colombia 1995-2011. *Ecos de Economía*, 15(33), 123-137.
- Smets, F. y Wouters, R. (2007). Choques y fricciones en los ciclos económicos de los Estados Unidos: un enfoque Bayesian DSGE. *American Economic Review*, 97 (3), 586-606.
- Suescún, R., & Steiner, R. (2017). Un modelo de equilibrio general dinámico para la evaluación de la política económica en Colombia.
- Torres Pineda, G. A. (2012). Evidencia de la regla fiscal en Colombia a través de un Modelo de Equilibrio General Dinámico Estocástico para una Economía Abierta. *Escuela de Economía*.
- World Health Organization. (2020). Coronavirus disease 2019 (COVID-19): situation report, 59.
- Wickens, M. (2014). How useful are DSGE macroeconomic models for forecasting?. *Open*

Yu, K. D. S., & Aviso, K. B. (2020). Modelling the Economic Impact and Ripple Effects of Disease Outbreaks. *Process Integration and Optimization for Sustainability*, 1-4.

Zhao, S., & Chen, H. (2020). Modeling the epidemic dynamics and control of COVID-19 outbreak in China. *Quantitative Biology*, 1-9.

## **Anexo:**

### **Desarrollo matemático del Modelo Macroeconomía en los tiempos del COVID-19**

#### **Ecuaciones del modelo dinámico estocástico**

##### **Modelación de los hogares (1-5)**

Sustitución ocio-consumo

$$\frac{co_t^{etac}}{1-no_t^{etan}} = \frac{ipsic_0psic_t(1-\tau h_t)w_t}{(ipsin_0psin_t)} \quad (1)$$

Ecuación de Euler

$$\frac{co_{t+1}^{etac}}{co_t^{etac}} = \beta \frac{ir_{t+1}}{pi_{t+1}} \quad (2)$$

Función de consumo real

$$c_t = co_t ipsic_t \quad (3)$$

Función de trabajo real

$$n_t = no_t ipsin_t \quad (4)$$

Restricción presupuestaria de los hogares

$$bf_t - \frac{bf_{t-1} * ir_t}{\theta * \pi_t} = (1 - \tau h_t)w_t n_t + er_t f_t - c_t \quad (5)$$

##### **Modulo SIR (6-12)**

Participación de la población sana

$$ssan_t = ssan_{t-1}(1 - tc_t) + (1 - ssan_{t-1})tr_t \quad (6)$$

Participación población enferma

$$senf_t = 1 - ssan_t \quad (7)$$

Ponderador del consumo real

$$ipsic_t = racc_t (csan * ssan_t + cenf(1 - ssan_t)) \quad (8)$$

Ponderador del trabajo real

$$ipsin_t = racn_t (nsan * ssan_t) + nenf(1 - ssan_t) \quad (9)$$

Racionamiento del consumo

$$racc_t = (racc_{t-1} idist_t^{eracc})^{\rho_{20}} racc_0^{1-\rho_{20}} \quad (10)$$

Racionamiento del trabajo

$$racn_t = (racn_{t-1} idist_t^{eracn})^{\rho_{21}} (racn_0^{1-\rho_{21}}) \quad (11)$$

Tasa de contagio

$$tc_t = idist_t^{etcd} atc_t ssan_{t-1}^{atc} (1 - ssan_t)^{\beta tc} \quad (12)$$

### **Modelación de la inversión (13-18)**

Ecuación optimización dinámica de los inversionistas

$$q_t = \frac{1}{\gamma} \left( \frac{\phi_{t+1} \pi_{t+1}}{ir_{t+1}} - 1 \right) \quad (13)$$

Ecuación de la q de Tobin

$$q_t = \frac{i_t}{k_{t-1}} \quad (14)$$

Función costos de capital

$$\phi_t = r_t - \frac{\gamma}{2} q_t^2 - q_t + \phi_{t+1} (\delta + q_t) \frac{\pi_{t+1}}{ir_{t+1}} \quad (15)$$

Restricción de recursos

$$df_t = i_t + df_{t-1} \frac{ir_t}{\theta * \pi_t} - \left( \frac{r_t k_{t-1}}{\theta} + ga_t \right) (1 - \tau k_t) \quad (16)$$

Ecuación de equilibrio de fondos prestables

$$bf_t = df_t \quad (17)$$

Ecuación del movimiento del capital

$$k_t = \frac{\delta}{\theta} k_{t-1} + i_t \quad (18)$$

### **Modelación de las empresas (19-23)**

Productividad marginal del capital

$$\alpha k_{t-1}^{\alpha-1} (\theta^{1-\alpha}) z_t n_t^{1-\alpha} = \frac{r_t}{\lambda_t} \quad (19)$$

Productividad marginal del trabajo

$$(1 - \alpha) k_{t-1}^{\alpha} (\theta^{-\alpha}) z_t^{1-\alpha} n_t^{-\alpha} = \frac{w_t}{\lambda_t} \quad (20)$$

Función de producción de la economía tipo Cobb-Douglas

$$y_t = \left( \frac{k_{t-1}}{\theta} \right)^{\alpha} (z_t n_t)^{1-\alpha} \quad (21)$$

Función de ganancias

$$ga_t = y_t (py_t - \lambda_t) \quad (22)$$

Función mark-up

$$py_t = (1 + ma) \lambda_t \quad (23)$$

### Modelación de la demanda de importaciones (24-27)

Función de restricción de demanda de importaciones

$$c_t + i_t + g_t = b \left( \omega * m_t^{\left(\frac{\sigma-1}{\sigma}\right)} + (1 - \omega) d_t^{\left(\frac{\sigma-1}{\sigma}\right)} \right)^{\frac{\sigma}{\sigma-1}} \quad (24)$$

Función de la senda de expansión

$$\frac{m_t}{d_t} = \left( \frac{pm_t(1-\omega)}{pd_t\omega} \right)^{-\sigma} \quad (25)$$

Función de las compras totales al exterior

$$c_t + g_t + i_t = (1 + iva_t)(pm_t m_t + pd_t d_t) pm_t \quad (26)$$

Función del precio de las importaciones en moneda doméstica

$$pm_t = er_t p_w m (1 + aran_t) \quad (27)$$

### Modelación de la demanda de exportaciones (28-29)

Función de restricción de la demanda de exportaciones

$$x_t = b_e \left( \omega_e x_t^{\left(\frac{\sigma_e-1}{\sigma_e}\right)} + (1 - \omega_e) x x_t^{\left(\frac{\sigma_e-1}{\sigma_e}\right)} \right)^{\left(\frac{\sigma_e}{\sigma_e-1}\right)} \quad (28)$$

Función de la senda de expansión

$$\frac{x_t}{x x_t} = \left( \frac{p_w x_t (1 - \omega_e)}{p_w * \omega_e} \right)^{-\sigma_e} \quad (29)$$

### Modelación de la oferta de exportaciones (30-33)

Función restricción de la oferta de exportaciones

$$y_t = b_d \left( \omega_d x_t^{\left(\frac{\sigma_d-1}{\sigma_d}\right)} + (1 - \omega_d) d_t^{\left(\frac{\sigma_d-1}{\sigma_d}\right)} \right)^{\left(\frac{\sigma_d}{\sigma_d-1}\right)} \quad (30)$$

Función de la senda de expansión

$$\frac{x_t}{d_t} = \left( \frac{p x_t (1 - \omega_d)}{p d_t \omega_d} \right)^{-\sigma_d} \quad (31)$$

Función de las ventas totales de las empresas domésticas

$$p y_t y_t = p x_t x_t + p d_t d_t \quad (32)$$

Función del precio de las exportaciones en moneda doméstica

$$p x_t = er_t p_w x_t \quad (33)$$

### Restricción presupuestal del gobierno (34-36)

$$s_t er_t = \frac{er_t s_{t-1}(1+r_t)}{\theta} - \tau k_t \left( \frac{r_t k_{t-1}}{\theta} + g a_t \right) - \tau h_t w_t n_t - (c_t + i_t + g_t) \frac{iva_t}{1+iva_t} - pwm * \frac{m_t}{1+aran_t} \quad (34)$$

Función del costo del endeudamiento público

$$r i_t = r m + a \frac{s_t er_t}{pib_t} \quad (35)$$

Función del PIB

$$pib_t = c_t + i_t + g_t + x_t - \frac{m_t}{1+aran_t} \quad (36)$$

Cuenta corriente: Balanza de Pagos (37)

$$walras = p w x_t x_t + f_t + s_t - (p w m * m_t) - \frac{s_{t-1}(1+r_t)}{\theta} \quad (37)$$

### Procesos exógenos (38-52)

Proceso exógeno productividad

$$z_t = z_{t-1}^{\rho_1} \frac{z_0^{1-\rho_1}}{e_1} \quad (38)$$

Proceso exógeno gasto público

$$g_t = g_{t-1}^{\rho_2} \frac{g_0^{1-\rho_2}}{e_2} \quad (39)$$

Proceso exógeno remesas del exterior

$$f_t = f_{t-1}^{\rho_3} \frac{f_0^{1-\rho_3}}{e_3} \quad (40)$$

Proceso exógeno nivel de comercio mundial

$$x t_t = x t_{t-1}^{\rho_4} \frac{x t_0^{1-\rho_4}}{e_4} \quad (41)$$

Proceso exógeno inflación

$$\pi_t = \pi_{t-1}^{\rho_5} \frac{\pi_0^{1-\rho_5}}{e_5} \quad (42)$$

Proceso exógeno tasa de impuestos indirectos

$$iva_t = iva_{t-1}^{\rho_7} \frac{iva_0^{1-\rho_7}}{e_7} \quad (43)$$

Proceso exógeno tasa de aranceles

$$aran_t = aran_{t-1}^{\rho_8} \frac{aran_0^{1-\rho_8}}{e_8} \quad (44)$$

Proceso exógeno tasa de impuestos al capital

$$\tau k_t = \tau k_{t-1}^{\rho_9} \frac{\tau k_0^{1-\rho_9}}{e_9} \quad (45)$$

Proceso exógeno ponderador del consumo en las preferencias

$$psic_t = psic_{t-1}^{\rho_{12}} \frac{psic_0^{1-\rho_{12}}}{e_{12}} \quad (46)$$

Proceso exógeno ponderador del trabajo en las preferencias

$$psin_t = psin_{t-1}^{\rho_{13}} \frac{psin_0^{1-\rho_{13}}}{e_{13}} \quad (47)$$

Proceso exógeno de la tasa de recuperación

$$tr_t = tr_{t-1}^{\rho_{15}} \frac{tr_0^{1-\rho_{15}}}{e_{15}} \quad (48)$$

Proceso exógeno modulo SIR (factor de contagio)

$$atc_t = atc_{t-1}^{\rho_{18}} \frac{atc_0^{1-\rho_{18}}}{e_{18}} \quad (49)$$

Proceso exógeno distanciamiento social

$$idist_t = idist_{t-1}^{\rho_{19}} \frac{idist_0^{1-\rho_{19}}}{e_{19}} \quad (50)$$

Endogenización error del distanciamiento social

$$e_{19t} = (e_{18(t-1)})^{rpp} \quad (51)$$

Endogenización error de la productividad

$$e_{1t} = (e_{18(t-1)})^{etfpatc} (e_{19(t-1)})^{etfpidist} * e_0 \quad (52)$$

### **Cierre Fiscal (53)**

$$\tau h_t = \tau h_0 + \tau_{hk} \left( \frac{s_{t-1} e_{t-1}}{pib_{t-1}} - meta \right) \quad (53)$$