

# Consideraciones para la post-cuarentena

*¿Es la prolongación de la cuarentena la solución al problema?*

*Resultados de investigación: Modelación COVID-19 - Bogotá*



**Autores:** Juan M. Cordovez <sup>1</sup>, Mauricio Santos <sup>1</sup>, Carlos Bravo <sup>1</sup>, Jaime Cascante <sup>1</sup>.

**Revisaron:** Andrés Medaglia <sup>3</sup>, Juan Pablo Ramos <sup>2</sup>, Alf Onshuus <sup>4</sup>, Felipe Montes <sup>3</sup>, Diana Higuera <sup>3</sup>, Bernardo Caicedo <sup>2</sup>, Catalina González Uribe <sup>5</sup>, Andrés Burbano <sup>6</sup>, Silvia Restrepo <sup>7</sup>

**Diseño editorial:** Alejandro Calderón López <sup>6</sup>

<sup>1</sup> Grupo de Biología Matemática y Computacional (BIOMAC), Departamento de Ingeniería Biomédica

<sup>2</sup> Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

<sup>3</sup> Departamento de Ingeniería Industrial

<sup>4</sup> Departamento de Matemáticas

<sup>5</sup> Facultad de Medicina

<sup>6</sup> Departamento de Diseño

<sup>7</sup> Vicerrectoría de Investigación y Desarrollo

# Introducción

El objetivo de este modelo es **establecer el efecto que pueden tener las medidas de mitigación de la propagación del COVID-19 en Bogotá**. Para esto se construyó un modelo matemático para estudiar la dinámica de contagio en un ambiente urbano realista. Se evalúan cinco alternativas:

- *El efecto de restringir el número de personas que se pueden movilizar.*
- *El efecto de extender la duración de las restricciones.*
- *El efecto de extender la restricción hasta el 30 de abril y de repetirla por el mes de junio.*
- *El efecto de extender la restricción hasta el 30 de abril y repetirla en intervalos de dos semanas con dos semanas en el medio hasta el primero de agosto*
- *El efecto de alargar la restricción hasta el 30 de abril y complementar con cierre de colegios o medidas restrictivas para el 60% de los adultos en el mes de mayo.*

# Descripción y objetivo

El modelo propuesto es un modelo que combina modelación por agentes y ecuaciones diferenciales estocásticas. La modelación por agentes permite incluir aspectos del comportamiento de las personas como, por ejemplo, su lugar de vivienda, las personas con las que interactúa en su trabajo o escuela y su movilidad por la ciudad.

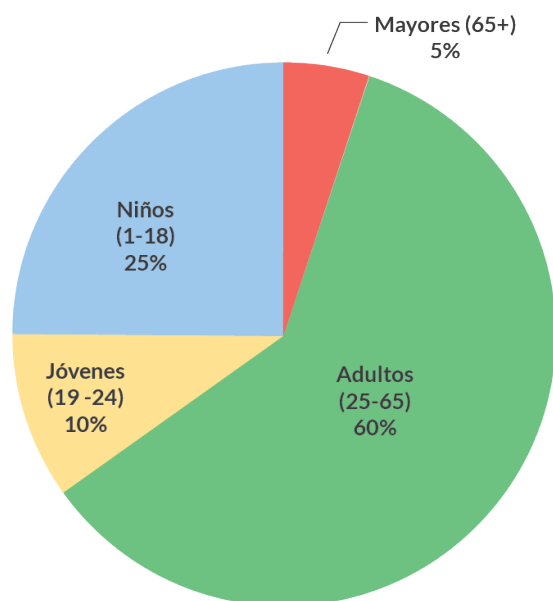
También, permite incluir elementos de la infraestructura de una ciudad como lugar donde vive la gente, lugares de trabajo, colegios, hospitales y universidades. Las ecuaciones diferenciales se usan para entender el progreso de la epidemia, la evolución de la infección, la tasa de hospitalización y muerte. La estocasticidad permite incluir la sensibilidad intrínseca de estos modelos a las condiciones iniciales y la configuración espacial. El objetivo de este modelo es establecer el efecto que pueden tener las medidas de mitigación de la propagación del COVID-19 en Bogotá.

# Supuestos del modelo

**1.** Se asume la población dividida en 4 grupos etáreos:

- Niños (1-18 años), un 25% de la población.
- Jóvenes (19 a 24 años), un 10%.
- Adultos (25 a 65 años), un 60%.
- Mayores (65+ años), un 5%.

No se consideran nacimientos, ni muertes por causas diferentes a COVID-19. La simulación se hace por 6 meses y no se consideran cambios de los individuos en los grupos de edad.



Población total: 25,000 personas

**2.** Se asume una ciudad hipotética con 25.000 habitantes, distribuidos en:

- 4846 viviendas
- 3 colegios
- 1 universidad
- 49 lugares de trabajo
- 1 hospital.

Simulaciones con ciudades más grandes son posibles, pero computacionalmente costosas. Por razones de tiempo, presentamos los resultados con esta ciudad pequeña. Sin embargo, los resultados que se obtienen con ciudades mas grandes son muy similares en cuanto a la curva de infección en porcentaje.

**3.** Los individuos se pueden mover según las siguientes reglas:

- Los niños van al colegio más cercano.
- Los jóvenes van a una universidad escogida de forma aleatoria.
- Los adultos van a trabajar a un lugar escogido de forma aleatoria.
- Los mayores permanecen en sus casas.
- Todos los individuos van a sus lugares de trabajo por un periodo de 8 horas y están en su casa el resto del tiempo. De las 16 horas en casa solo 8 horas se asumen que cuentan para contagiarse (no hay contagios mientras duermen).
- Todos los individuos se pueden mover libremente a no ser que, 1) estén hospitalizados, 2) se imponga una restricción a su movimiento.
- Las personas que requieren hospitalización van al hospital mas cercano.
- Se asumen grupos familiares de 5 personas. Los individuos que no pueden moverse se quedan en su vivienda

**4.** El modelo epidemiológico divide la población en:

• **Susceptibles**

• **Expuestos:** personas que han adquirido el virus pero es muy temprano para ser identificadas por síntomas o pruebas, pero pueden contagiar a tasas menores.

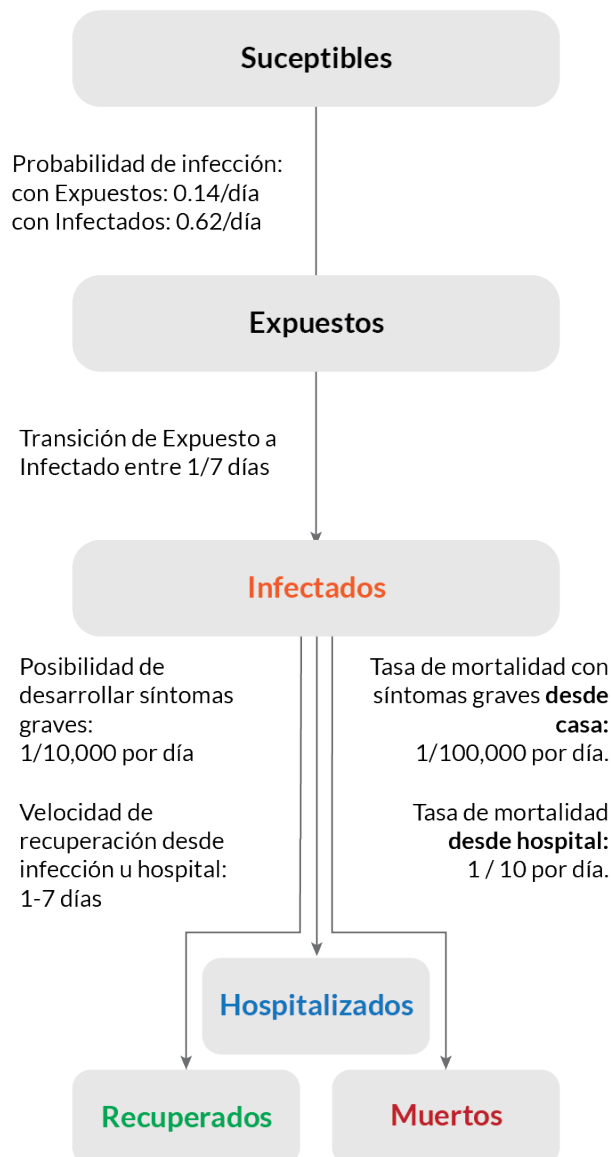
• **Infectados:** personas con carga viral alta, pueden ser asintomáticos o sintomáticos leves a graves.

• **Hospitalizados**

• **Recuperados:** superan la infección y desarrollan anticuerpos, no pueden volver a infectarse

• **Muertos**

5. Las tasas de transición asumidas son:



6. Condiciones iniciales:

- 1 Infectado
- 3 expuestos

7. Los resultados se escalan para una ciudad de **8 millones de habitantes**

# Resultados

## ***Efecto de restringir movilidad a distintas proporciones de la población reflejado sobre el número de infectados.***

El cierre de colegios y universidades sumado a la restricción de la movilidad de los adultos desacelera la tasa de infección. Incrementar la restricción de 60% al 100% tiene efectos considerables en la tasa. La curva resaltada con 0% de adultos en casa corresponde al caso en el cual no hay restricción (colegios y universidades abiertas).

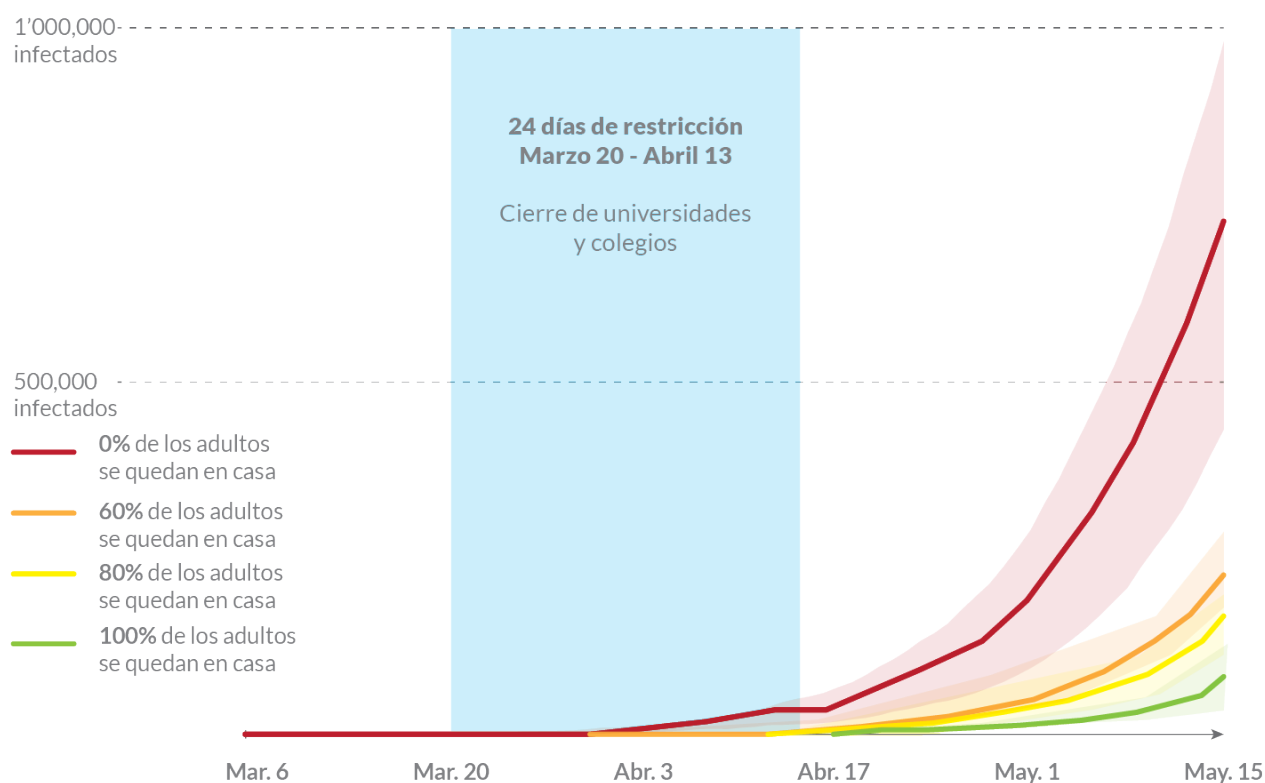


Fig. 1. Número de infecciones bajo distintas proporciones de restricción de movilidad. Marzo 6 hasta Mayo 15



Sin embargo, las restricciones no tienen efecto en la amplitud del pico de infecciones que se observan en el tiempo. En el caso sin ninguna restricción, el pico ocurre hacia Junio 8, por cada aumento en la restricción de la movilidad de los adultos además del cierre de colegios y universidades por 24 días entre marzo 20 y Abril 13 produce un aplazamiento en el pico de hasta 4 semanas en el caso de restringir el 100% de la movilidad.

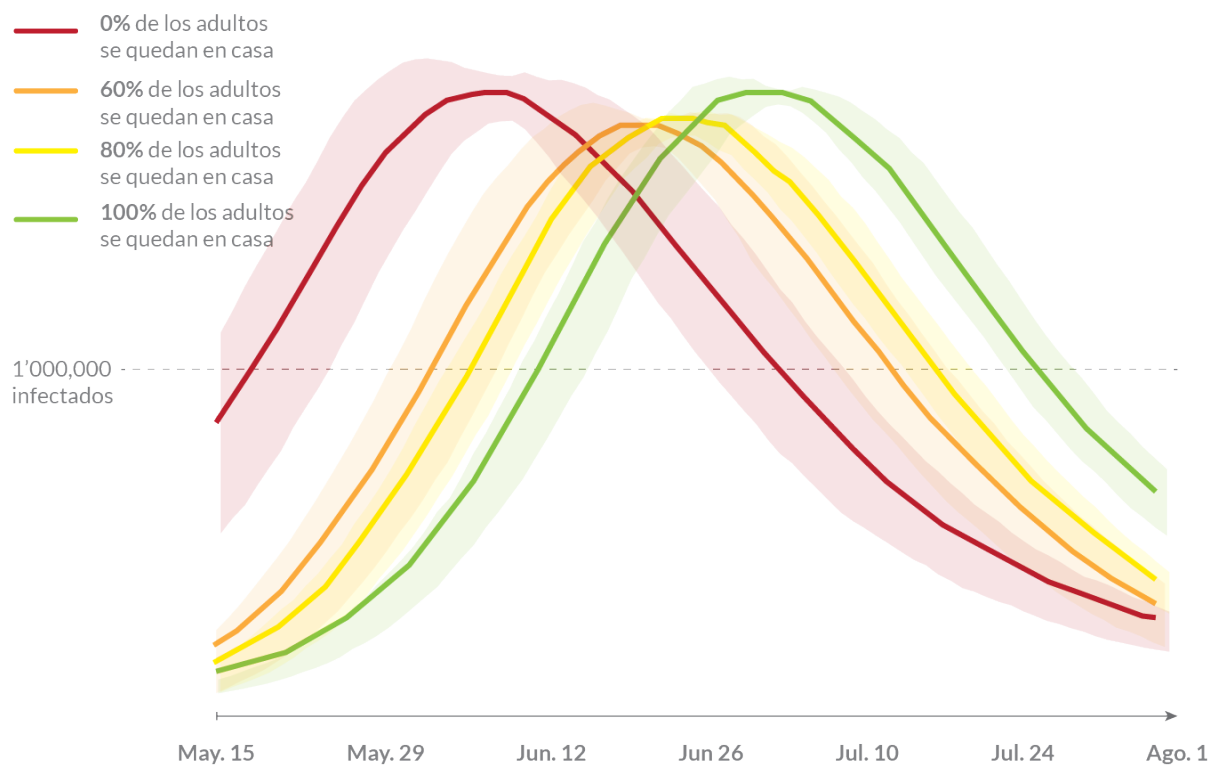


Fig. 2. Número de infecciones bajo distintas proporciones de restricción de movilidad. Mayo 15 hasta Agosto 1

### ***Número de personas en cuidados intensivos bajo diferentes proporciones de la población sujetas a restricción de la movilidad***

El número de personas que requieren una cama en la unidad de cuidados intensivos en el tiempo se reduce como consecuencia de la restricción durante las semanas siguientes a la implementación de las medidas y lo hace proporcional al número de personas que observen la restricción a la movilidad.

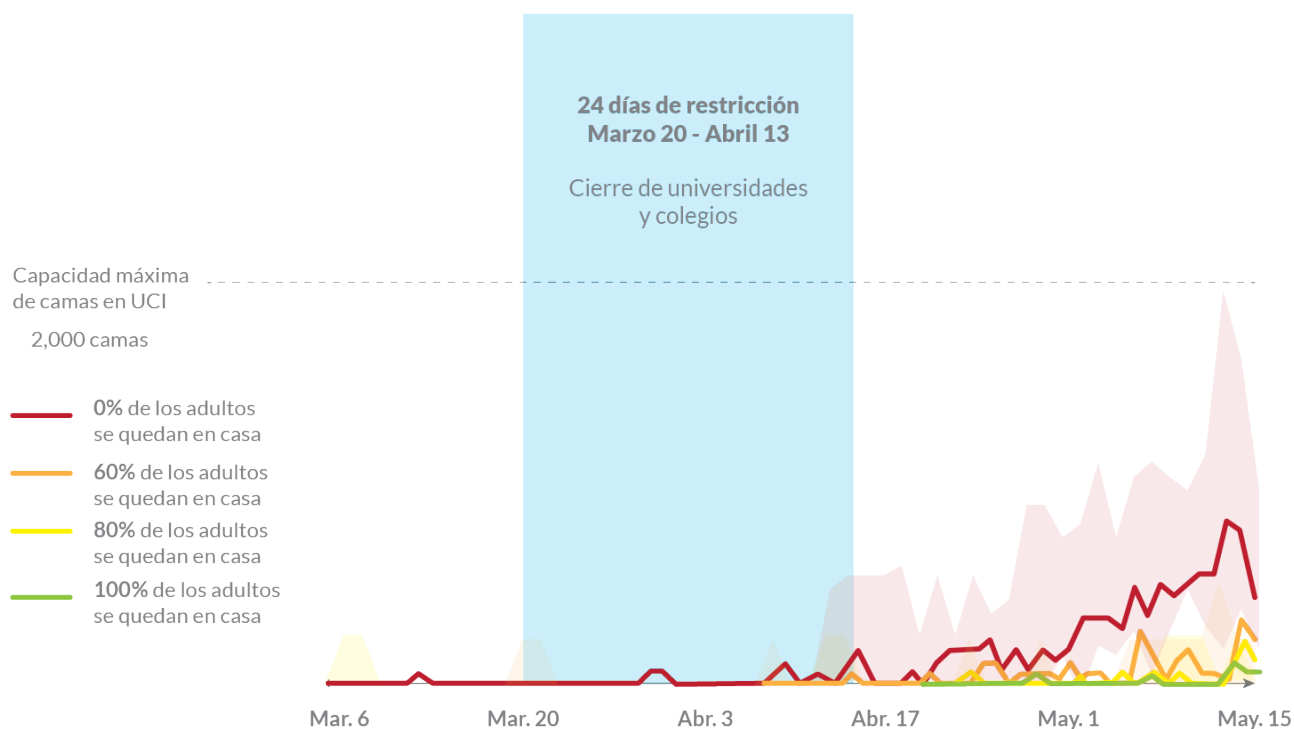


Fig. 3 Número de personas en UCI bajo distintas proporciones de medidas de restricción de movilidad. Marzo 6 hasta Mayo 15

Sin embargo, las restricciones no tienen efecto en la amplitud del pico de requerimiento de camas en la UCI que se observan en el tiempo. En el caso de ninguna restricción, el pico ocurre hacia Junio 8, por cada aumento en la restricción de la movilidad de los adultos más el cierre de colegios y universidades por 24 días entre marzo 20 y Abril 13 produce un aplazamiento en el pico de hasta 4 semanas en el caso de restringir el 100% de la movilidad

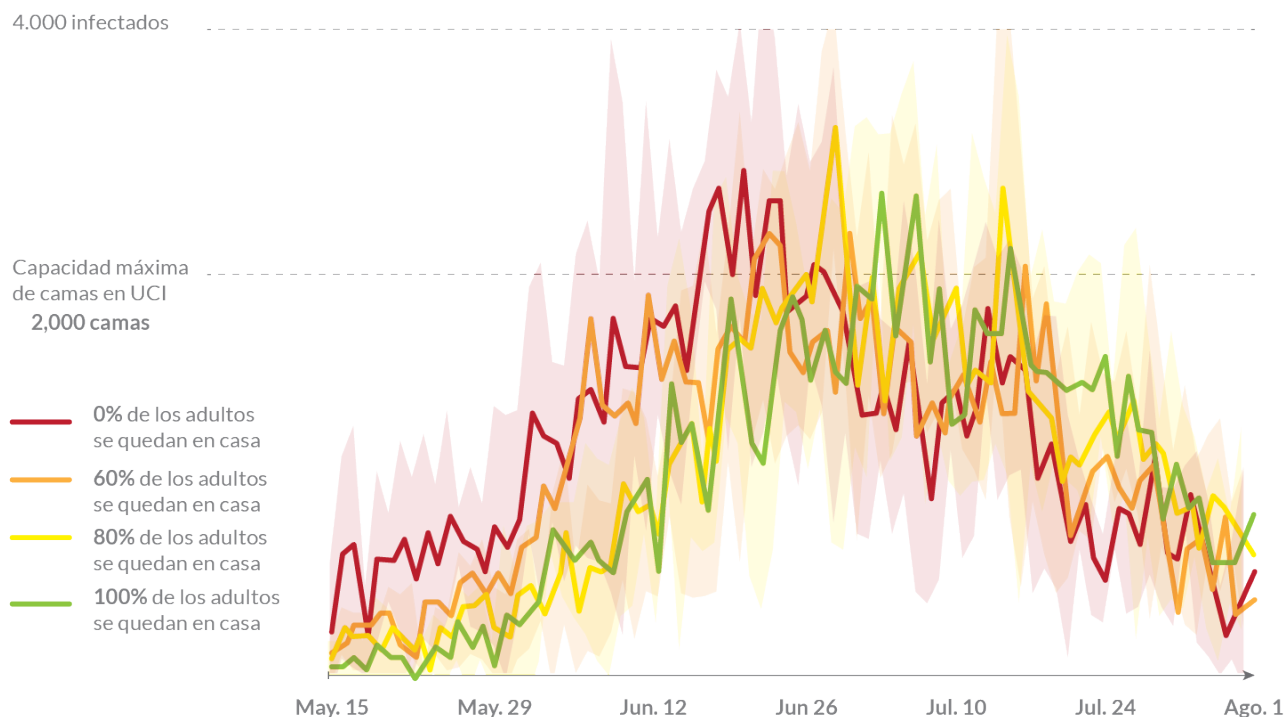


Fig. 4 Número de personas en UCI bajo distintas proporciones de medidas de restricción de movilidad. Mayo 15 hasta Agosto 1.

### ***Efecto de extender la duración de las restricciones reflejado sobre el número total de infectados.***

El cierre de colegios y universidades sumado a la restricción de la movilidad de los adultos desacelera la tasa de infección. Incrementar la duración de la restricción de 24 a 50 días tiene efectos considerables en la tasa. En las simulaciones se restringió al 100% de las personas durante los periodos de tiempo considerados.

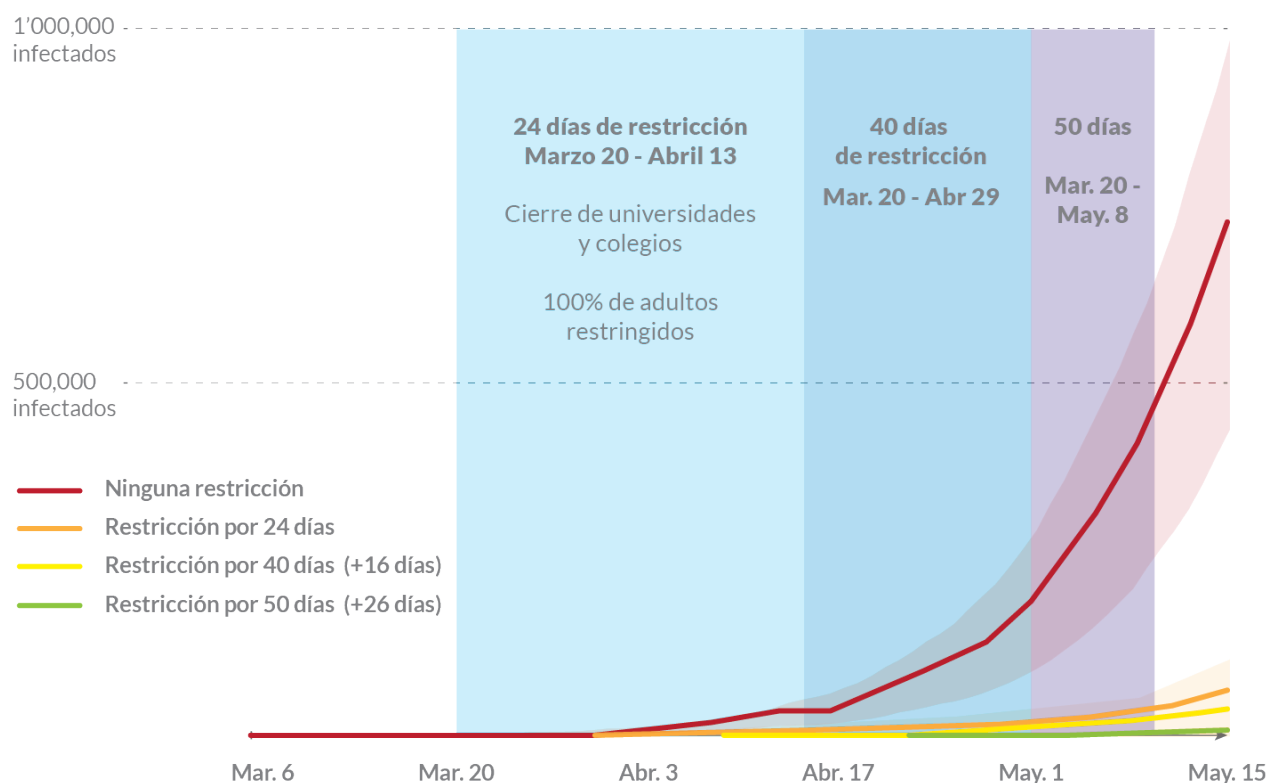


Fig. 5. Número de infecciones bajo distintas duraciones de la restricción de movilidad. Marzo 6 hasta Mayo 15

Sin embargo, las restricciones no tienen efecto en la amplitud del pico de infecciones que se observan en el tiempo. En el caso de ninguna restricción, el pico ocurre hacia Junio 8. Pasar de 24 días de restricción entre marzo 20 y abril 13 a 50 días entre marzo 20 y mayo 8, en la restricción de la movilidad de los adultos más el cierre de colegios y universidades, aplaza hasta 8 semanas el número máximo de casos.

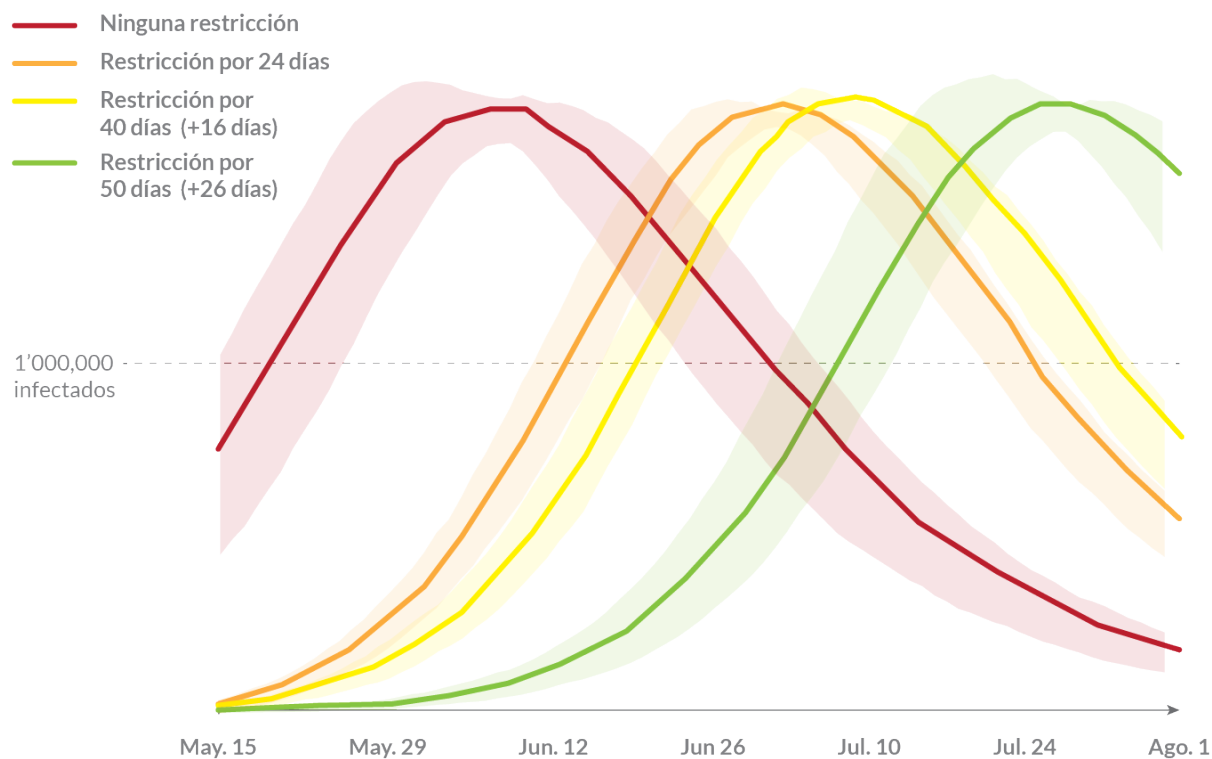


Fig. 6. Número de infecciones bajo distintas duraciones de la restricción de movilidad. Mayo 15 hasta Agosto 1.

## Número de personas en cuidados intensivos bajo diferentes duraciones de la restricción de la movilidad

El cierre de colegios y universidades sumado a la restricción de la movilidad de los adultos desacelera la tasa de infección. Incrementar la duración de la restricción de 24 a 50 días tiene efectos considerables en la tasa. En las simulaciones se restringió al 100% de las personas durante los periodos de tiempo considerados.

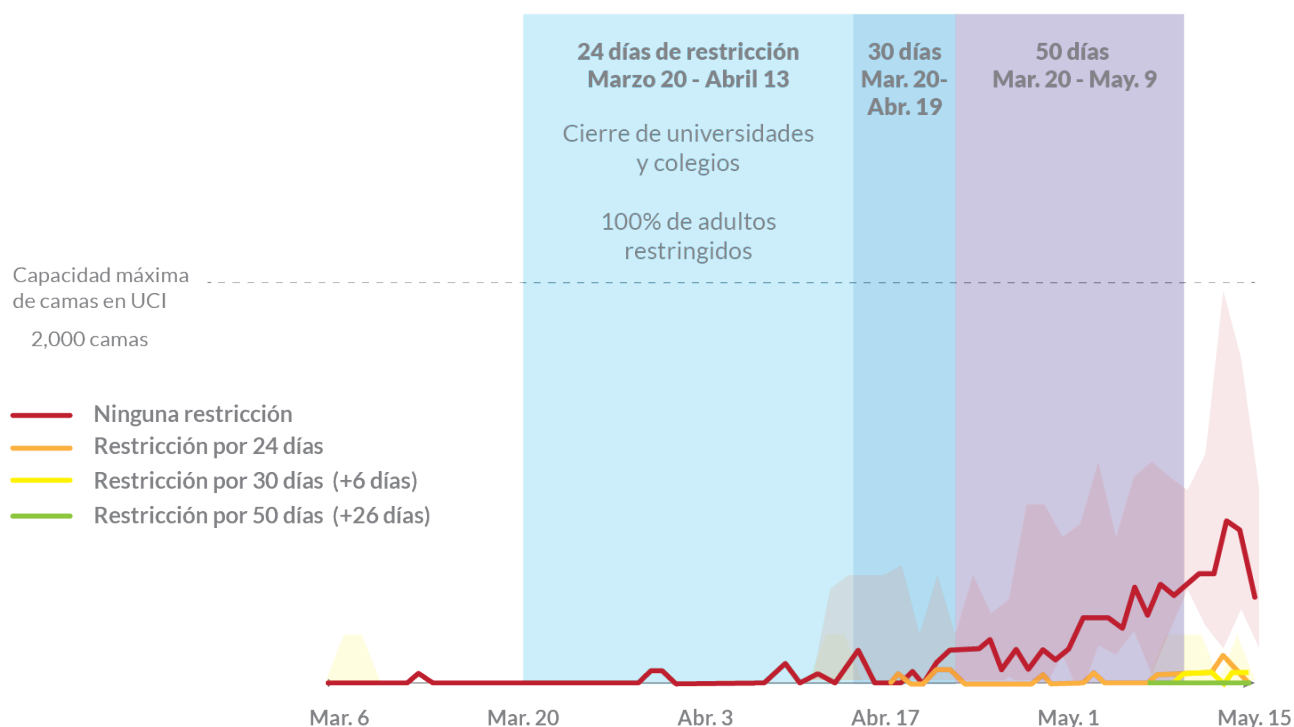


Fig. 7. Número de pacientes en UCI bajo distintas duraciones de las medidas de restricción de movilidad. Marzo 6 hasta Mayo 15

Sin embargo, las restricciones no tienen efecto en la amplitud del pico de infecciones que se observan en el tiempo. En el caso de ninguna restricción, el pico ocurre hacia Junio 8. Pasar de 24 días de restricción entre marzo 20 y abril 13 a 50 días entre marzo 20 y mayo 8, en la restricción de la movilidad de los adultos más el cierre de colegios y universidades, aplaza hasta 8 semanas el número máximo de casos.

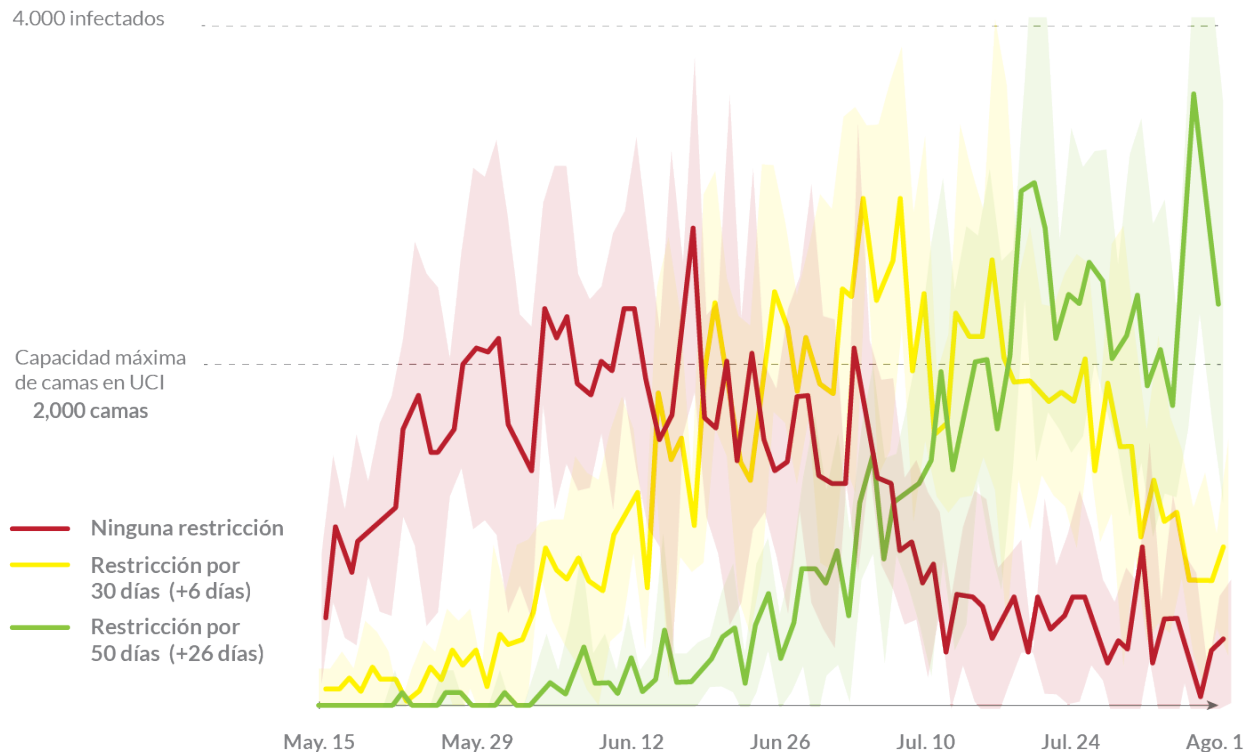


Fig. 8. Número de pacientes en UCI bajo distintas duraciones de las medidas de restricción de movilidad. Mayo 15 hasta Agosto 1

## Número total de personas infectadas al aumentar restricción hasta abril 30, liberar mayo y restringir junio

Extender la restricción del 60% de los adultos, colegios cerrados y universidades cerradas hasta el 30 de abril produce una disminución considerable del número de infectados para mayo 15.

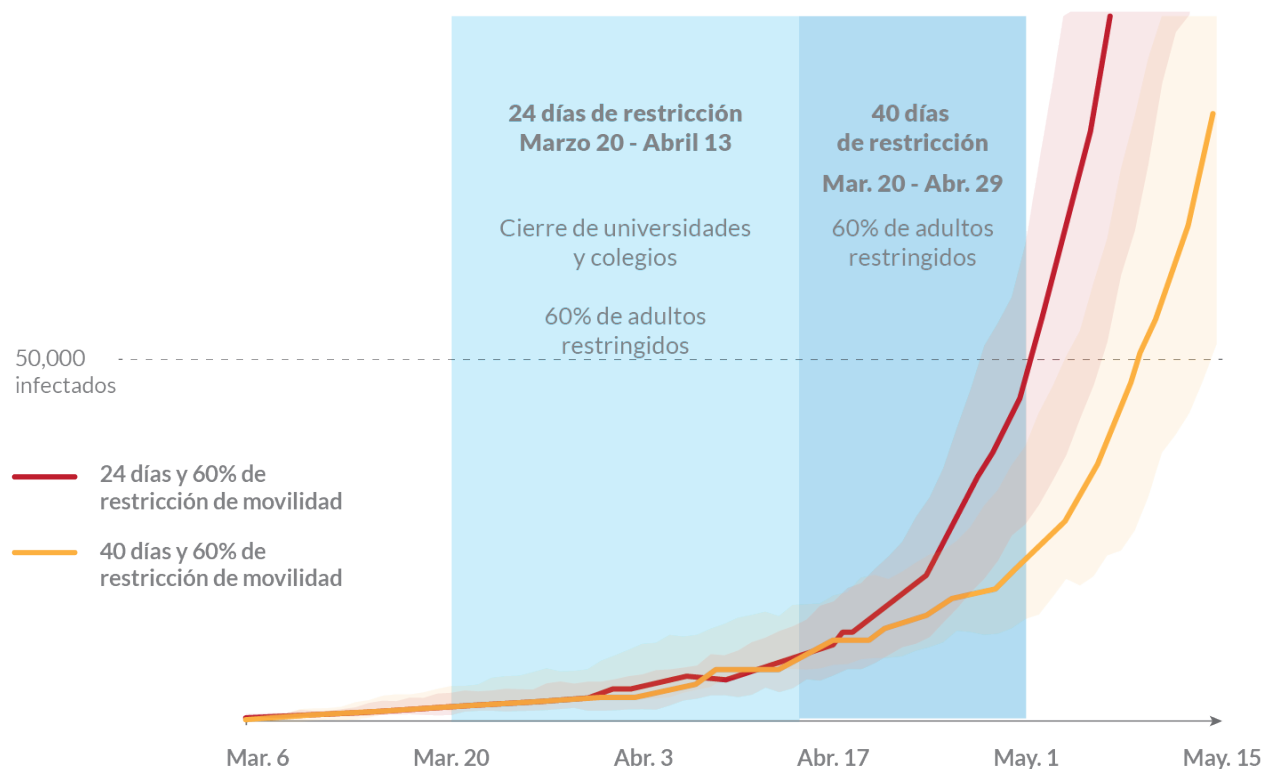


Fig. 9. Número total de infecciones al extender/no extender restricciones hasta abril 30. Marzo 6 hasta Mayo 15



Complementar la medida volviendo a imponer la restricción durante el mes de junio, empuja la curva hasta mediados de Julio (un mes de retraso) y reduce el número pico de infectados en un 10%.

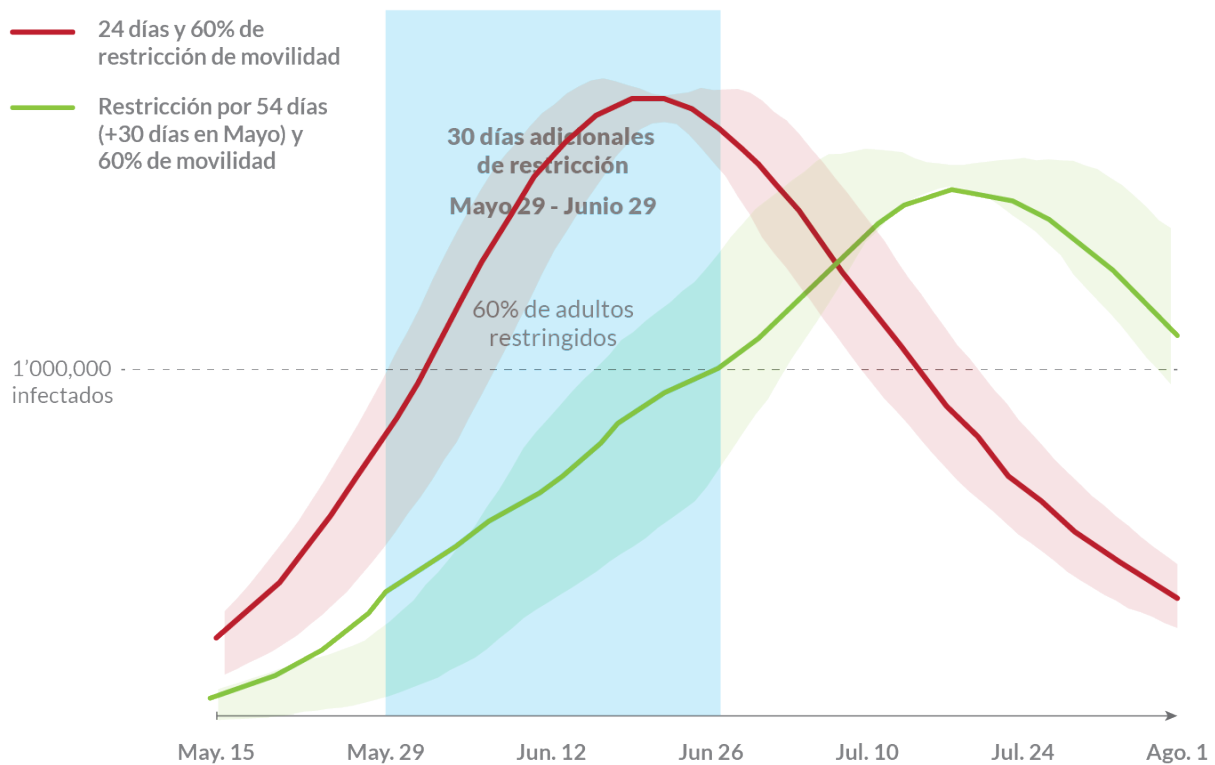


Fig. 10. Número total de infecciones al reincorporar restricciones desde Mayo 29 hasta Junio 29. Mayo 15 - Agosto 1

**Número total de personas infectadas al aumentar restricción hasta abril 30, y a partir de allí, restricciones de 14 días cada dos semanas.**

Extender la restricción del 60% de los adultos, colegio cerrados, universidades cerradas hasta el 30 de abril produce una disminución considerable del número de infectados para mayo 15.

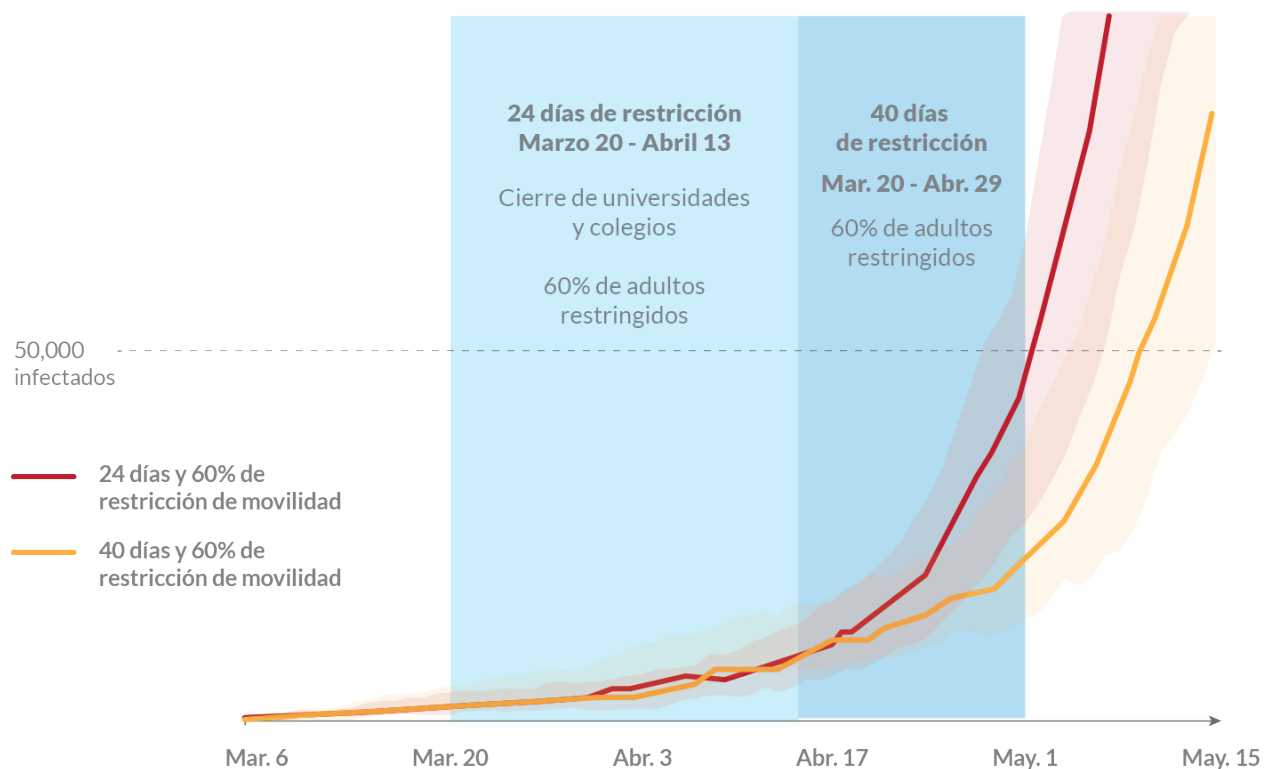


Fig. 11. Número total de infecciones al extender/no extender restricciones hasta abril 30. Marzo 6 hasta Mayo 15

Complementar la medida volviendo a imponer la restricción por periodos de 14 días cada dos semanas empuja la curva hasta mediados de Julio (un mes de retraso) y reduce el número pico de infectados en un 10%. Produce un efecto muy similar a la restricción de un mes .

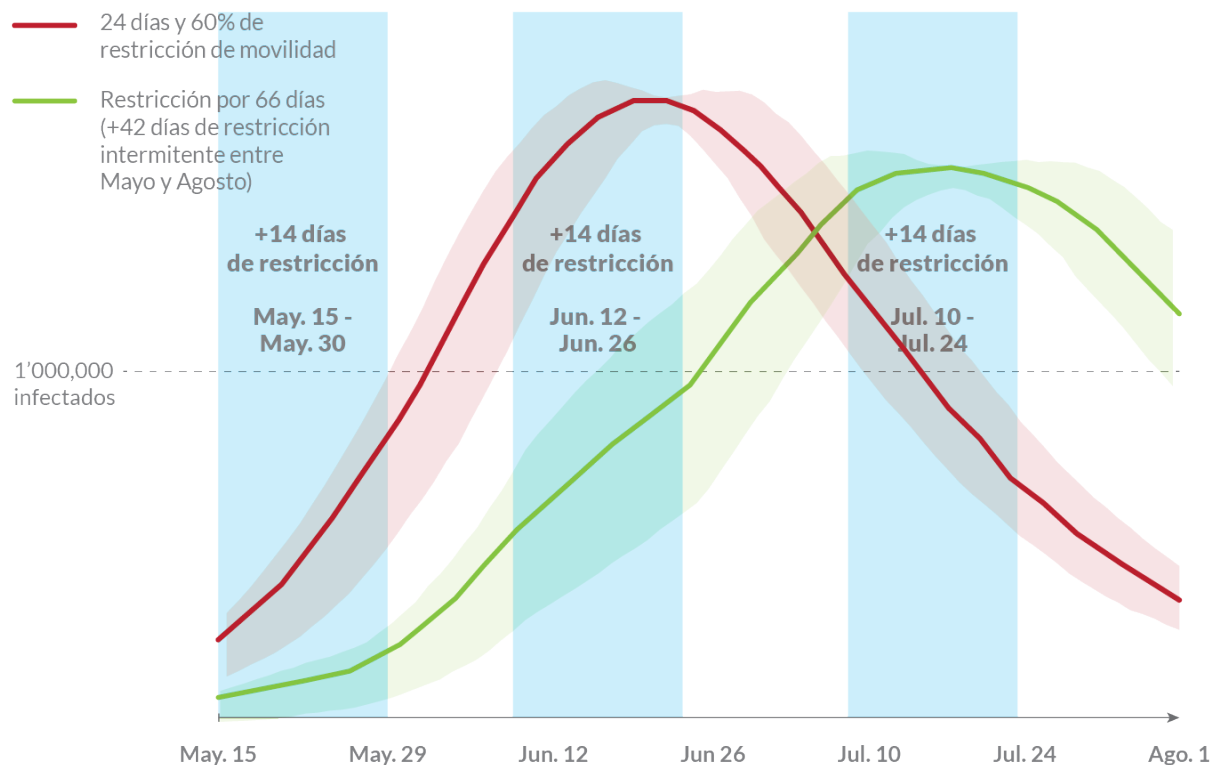


Fig. 12. Número total de infecciones al reincorporar restricciones en periodos de 14 días cada dos semanas. Mayo 15 - Agosto 1

## Efecto de cerrar colegios comparado con restringir la movilidad de los adultos

Es más eficiente extender la restricción de los adultos que la de los colegios hasta mayo 30.

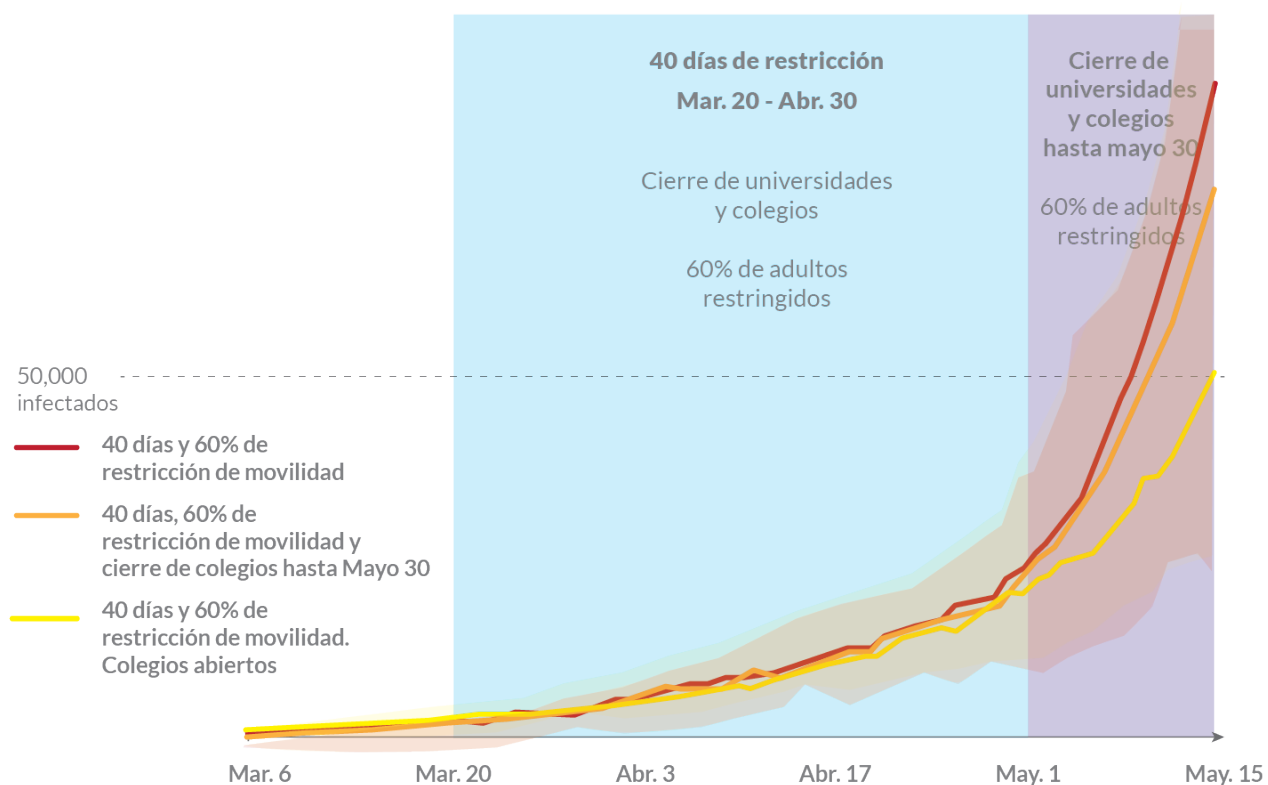


Fig. 13. Número total de infecciones al cerrar colegios y universidades hasta Mayo 30. Marzo 6 - Mayo 15.

Tanto cerrar los colegios como restringir los adultos en mayo produce una dinámica rápida en junio y julio: es más efectivo permitir la normalidad en mayo y volver a restringir junio

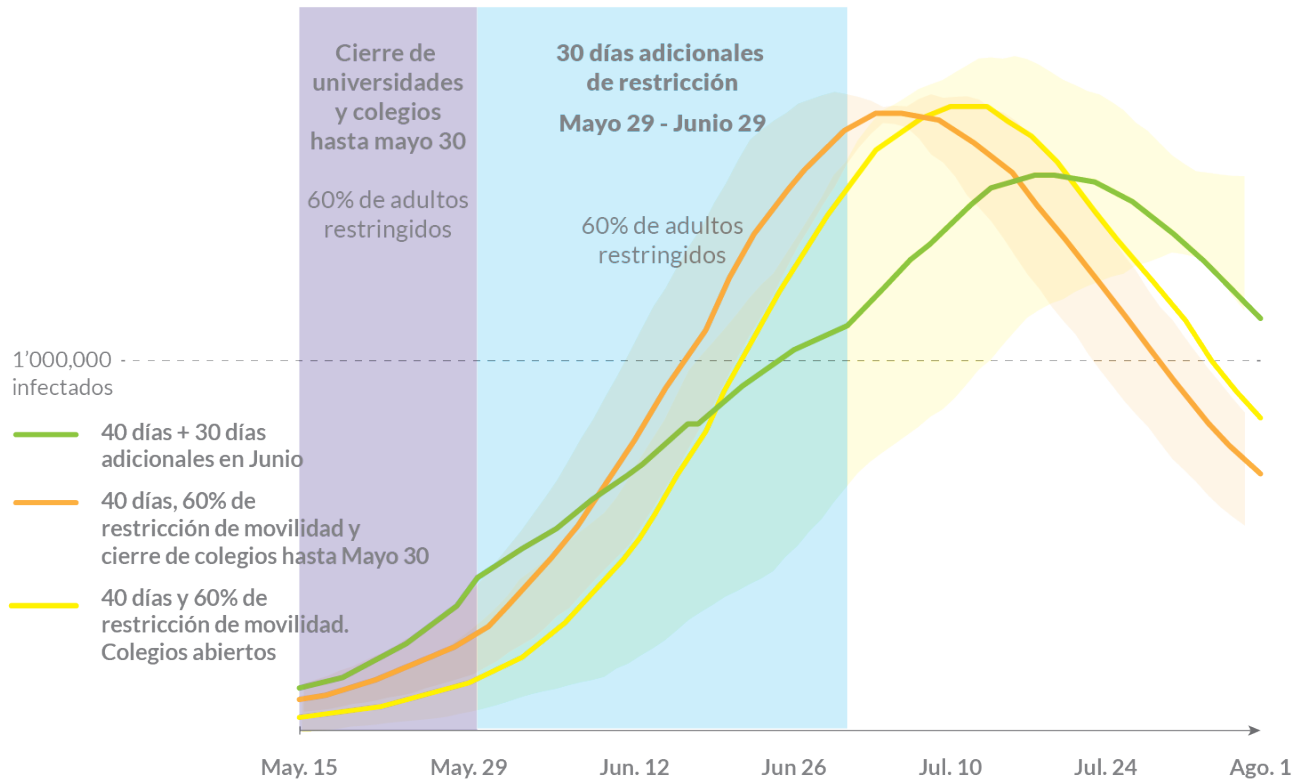


Fig. 14. Número total de infecciones al cerrar colegios y universidades hasta Mayo 30. Mayo 15 - Agosto 1.

**Efecto de restringir la movilidad y cierre de colegios de forma intermitente a partir de abril 30 con una periodicidad de una semana.**

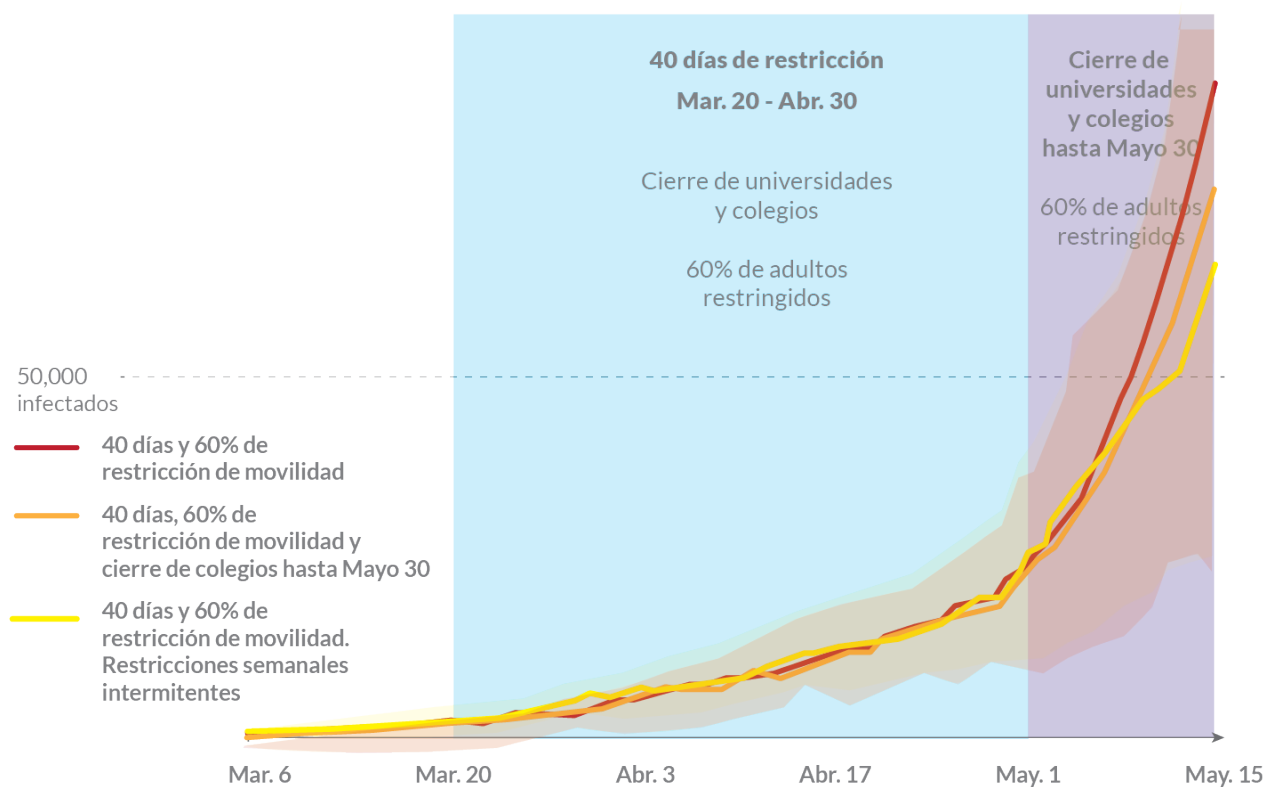


Fig. 15. Número total de infecciones al cerrar colegios y universidades hasta Mayo 30 y realizar cierres semanales intermitentes. Marzo 6 - Mayo 15

Se puede observar que para mayo 15 esta medida es más eficiente y continua siéndolo en los meses siguientes. Produce el menor de los picos y sucede igual de tarde que la restricción en la cual el mes de junio se implementa un nuevo cierre.

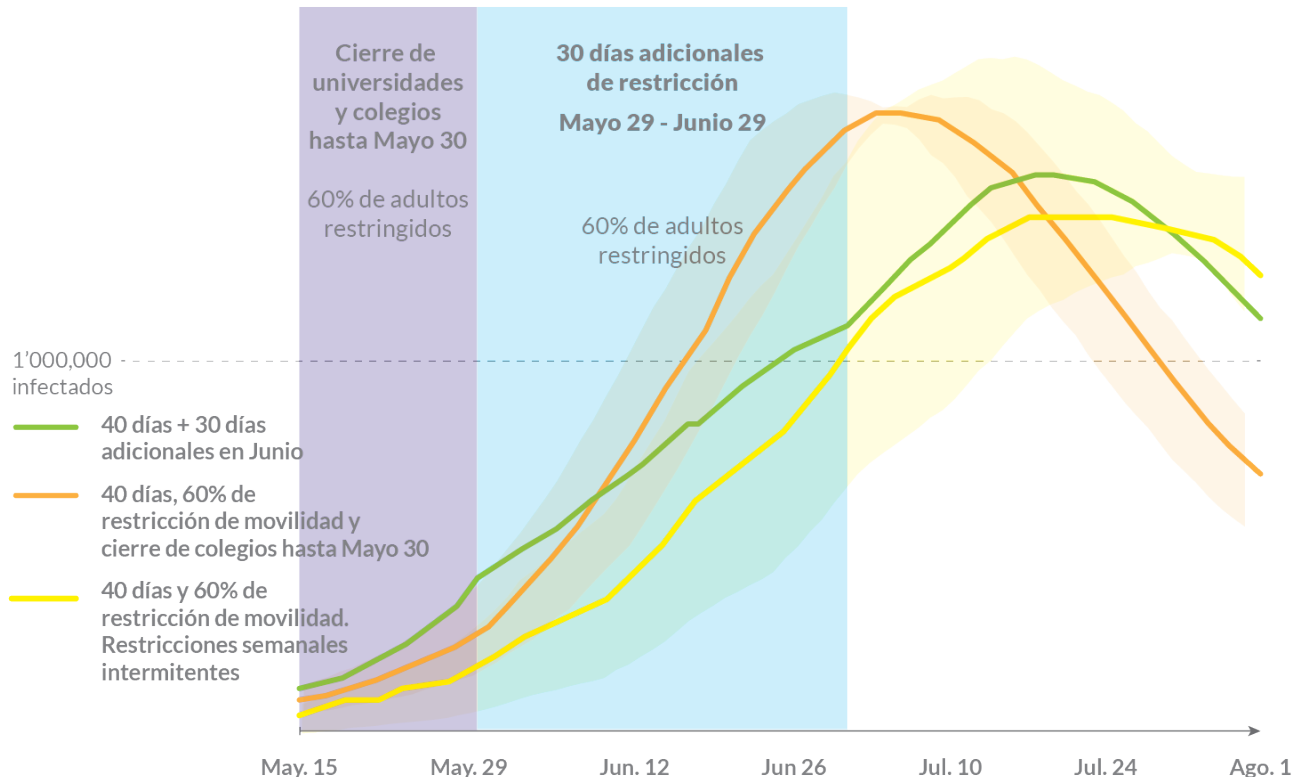


Fig. 16. Número total de infecciones al cerrar colegios y universidades hasta Mayo 30 y realizar cierres semanales intermitentes. Mayo 15 - Agosto 1

# Conclusiones

## Recomendaciones

1. Las medidas de mitigación implementadas permiten aplazar el crecimiento exponencial de los contagios, pero **no evitan que se exceda la capacidad de camas en las UCI**. Sin embargo, **son claves para la etapa de preparación de los sistemas de emergencia y de salud**.
2. **La duración de la restricción en el tiempo** o la proporción de personas que cobije la norma **tienen siempre el mismo efecto de desplazar la curva en el tiempo**.
3. Entre más larga en el tiempo y extensa en la proporción de población que cobija la restricción, **más se aplaza la época de alta demanda de los servicios de salud**.
4. Los cálculos presentados para la ciudad de Bogotá indican que una restricción hasta abril 30, con una liberación en el mes de mayo, seguida de una nueva restricción en el mes de junio, **produce un número menor de casos**. Un resultado similar se obtiene **cerrando cada dos semanas por dos semanas al 60% de movilidad**.
5. En el escenario de extender la restricción hasta abril 30 y complementarla con cierre de colegios y universidades hasta el 30 de mayo, encontramos que **levantar las restricciones de colegios y de movilidad de adultos al trabajo** (manteniendo el distanciamiento social) en el mes de mayo e implementarlas nuevamente en el mes de junio **es lo más eficiente para aplacar la curva de casos**.
6. Encontramos que el cierre de colegios y universidades **es menos eficiente en aplacar el crecimiento de la curva comparado con la restricción de la movilidad de adultos**.



7. Los modelos presentados se desarrollaron para contribuir al entendimiento del problema, pero **hay criterios adicionales que es crítico tener en consideración, como son la capacidad hospitalaria y especialmente de UCI**, y el tiempo que se requiere para incrementar esta capacidad. Los modelos presentados **todavía tienen limitaciones importantes en la manera como incorporan la capacidad hospitalaria y de UCI, y la posibilidad de colapso de ambos.**

8. Tal como sucede con todos los modelos que se están desarrollando actualmente, **nueva información que surja a medida que evoluciona la pandemia puede cambiar drásticamente los resultados presentados.** Igualmente los resultados pueden cambiar e ir perfeccionando los modelos y los datos de entrada.

## ***Limitaciones del modelo***

Los parámetros son estimados a partir de la literatura. La curva en Colombia es todavía incipiente para estimar las tasas a partir de los datos.

No se consideran otras actividades de las personas como transportarse (transporte público, privado, etc...) en la ciudad o entre ciudades, reuniones, eventos recreativos. Todas estas son actividades que aumentan las posibilidades de contagio.

En las simulaciones presentadas no se ha incluido tasas diferenciales de infección y muerte en los grupos de edades o por género. Esta limitación se puede remediar fácilmente con datos colectados.

## ***Fortalezas del modelo***

El modelo permite evaluar restricciones de movilidad por grupos de edades y el cierre parcial o total de colegios y universidades.

Se incluyen tasas de infección y muerte diferenciadas por grupos de edad.

Se evalúan medidas de diferente duración e intermitentes. Las medidas pueden afectar a diversos grupos.

Se estima el número de personas que requieren camas en unidades de cuidados intensivos y se compara con la capacidad hospitalaria.

Se estima la infección por sectores (en la ciudad) y se calcula la demanda en cada hospital comparándola contra su oferta (adaptado los datos de una ciudad en particular).