

# Estudio de recursos sanitarios de hospitalización general generados por la pandemia de SARS-CoV-2

## 1. Introducción

---

La secretaría distrital de salud (SDS) es la organización responsable de garantizar el ejercicio efectivo del derecho a la salud de toda la población de Bogotá. En este orden de ideas, la SDS ha sido la organización encargada de establecer medidas de control y mitigación del virus *SARS-CoV-2* en la ciudad desde su llegada el 6 de marzo de 2020 y que en la actualidad ha reportado más de 1442000 casos en la ciudad. En la toma de medidas se han hecho intervenciones farmacológicas (IF) como protocolos de bioseguridad, la ampliación de recursos sanitarios en la ciudad, instalar puntos de pruebas para detección de casos sospechosos y positivos y estrategias de vacunación masiva, sin embargo, debido a la limitación de no poder expandir indefinidamente los recursos sanitarios, se ha alcanzado un alto porcentaje de ocupación (del orden de 98% en la tercera ola vivida en Bogotá D. C.), generando un alto estrés en el sistema de salud en largos periodos de tiempo. Esto ha conllevado a restricciones totales en la movilidad y cuarentenas sectorizadas a nivel de localidades y UPZ, así como toques de queda y pico y cédula generalizado que han tenido efectos desfavorables en otros ámbitos como la economía de la ciudad de tal manera que la ciudadanía se encuentre cada vez más agotados de estas restricciones. Luego, se hace necesario poder cuantificar el potencial impacto de diferentes IF o intervenciones no farmacológicas (INF) como el uso de tapabocas, cuarentenas sectorizadas y restricciones de movilidad sin seguir perjudicando otros aspectos sociales como la economía de la ciudad. Por lo demás, actualmente la ciudad se encuentra finalizando una tercera ola de *SARS-CoV-2* que llegó a saturar los recursos sanitarios de la ciudad instalados hoy en día.

En particular, la SDS ha destinado un equipo de físicos, estadísticos y matemáticos del grupo de Análisis de Situación de Salud (ASIS-FEM) para hacer la implementación y despliegue de un clúster que funcione para realizar múltiples simulaciones de dos modelos matemáticos escogidos y cuyos datos queden estructurados en un lago de datos de un proyecto de Google Cloud Platform (GCP). De hecho, en la ejecución de esta labor se han implementado también procesos de scraping y automatización de procesos que permitan una actualización diaria de bases de datos de la SDS.

Para realizar lo anterior se propone implementar 2 modelos matemáticos que permitan realizar proyecciones de potenciales escenarios futuros de la ocupación de hospitalización general denominados Squire y FRED [1,2]. Estos modelos se caracterizan por ser modelos compartimentales y estocásticos con heterogeneidad en el contacto a través de matrices de contacto entre grupos etarios ordenados por quinquenios y por casos índices y susceptibles donde FRED también puede considerar aspectos como la vacunación masiva y desagregación espacial de la pandemia a nivel de localidades o UPZ. A partir de estos modelos, se calibran los parámetros utilizando el método de máxima verosimilitud (MLE) contrastado con datos

reportados por la SDS. Por último, se proyectan 2 escenarios que tengan en cuenta la introducción de la variante delta en la ciudad. Es importante aclarar que las proyecciones realizadas deben ser evaluadas por lo menos cada dos semanas para tener fiabilidad de los resultados.

## 2. Conjunto de datos

---

Las variables de entrada o los datos de entrenamiento para tener en cuenta son:

- Serie histórica de casos hospitalizados y porcentaje de ocupación en hospitalización general para pacientes diagnosticados con SARS-CoV-2/Covid-19 en Bogotá. A la fecha son del orden de 475 datos a los que se tiene acceso.
- Serie histórica de casos en UCI y porcentaje de ocupación en UCI para pacientes diagnosticados con SARS-CoV-2/Covid-19 en Bogotá. A la fecha son del orden de 507 datos a los que se tiene acceso.
- Serie histórica de casos fallecidos por fecha de muerte para pacientes que fueron diagnosticados con SARS-CoV-2/Covid-19 en Bogotá. A la fecha son del orden de 524 datos a los que se tiene acceso.

Aquí vale la pena aclarar que estos datos son de actualización diaria y por temas de confidencialidad no se comparten estos datos a terceros. Además, todos los datos son de importancia para el problema para establecer de forma óptima los parámetros de ajuste del modelo.

## 3. Características y procesamiento de datos

---

## 4. Modelos y técnicas

---

**LHS:** Dado que existe una limitación de presupuesto y número de simulaciones que simultáneamente se realicen al tiempo, entonces se opta por un muestro de parámetros para correr las diferentes simulaciones escogido de una manera lo suficientemente apropiada mediante el método de Latin hypercube sampling (LHS) [3].

**LOOCV:** Para la calibración de parámetros de ambos modelos se escoge una partición de los datos de fechas de muerte (fallecidos diarios) durante las últimas tres semanas (21 días) de tal manera que se tome como datos de entrenamiento los datos acumulados hasta tres semanas previas al último dato reportado por la SDS, luego, se repite este proceso de calibración agregando un día en el conjunto de datos y repitiendo hasta tener el total acumulado de datos hasta dos semanas previas al último dato reportado por la SDS, lo cual obedece a la metodología de Leave-one-out cross-validation (LOOCV).

**SQUIRE:** Teniendo en cuenta los requerimientos que puede tener la SDS, es necesario un modelo de respuesta relativamente rápida para las proyecciones de Covid-19 en la ciudad. En ese orden de ideas, se decide utilizar el modelo epidemiológico Squire [1] que aún cuando tiene muchas ventajas como la heterogeneidad entre grupos etarios carece de aspectos que se han

acentuado a partir de la tercera ola como lo es la introducción de variantes biológicas en la ciudad, los potenciales efectos de la vacunación masiva y no desagregación espacial a nivel de localidades o UPZ.

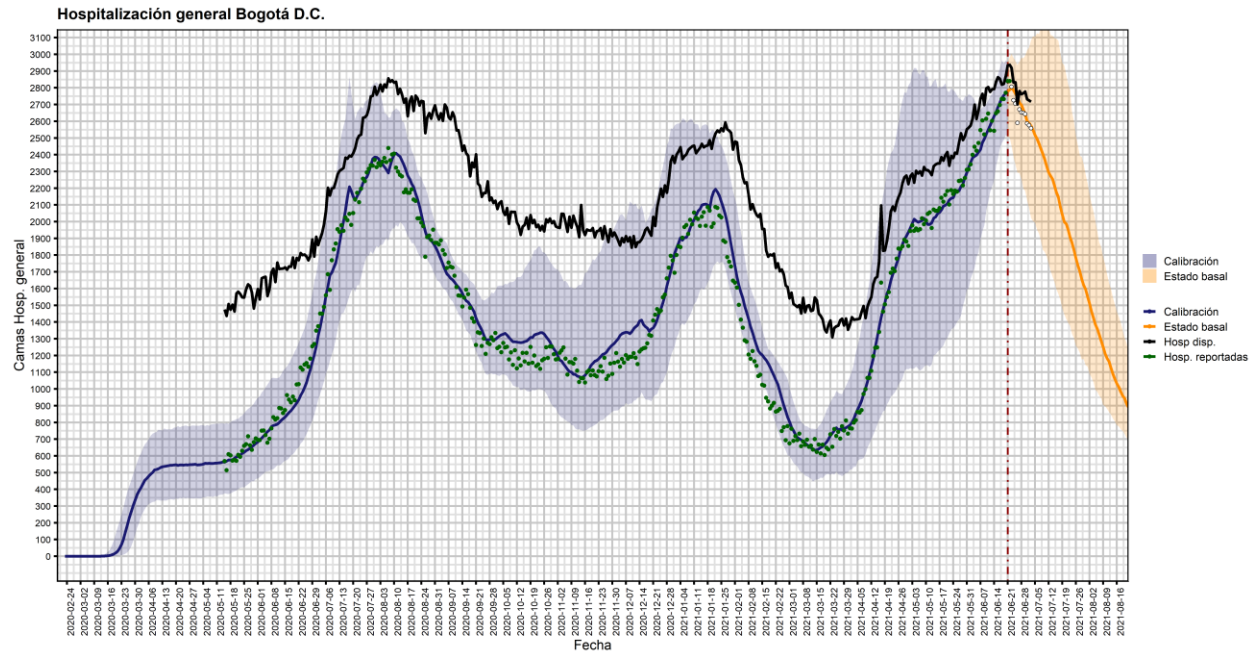
**FRED:** Teniendo en cuenta los requerimientos que puede tener la SDS a niveles muy específicos para la toma de medidas que no entorpezcan el proceso de reactivación económica, es necesario un modelo de respuesta focalizada para las proyecciones de Covid-19 en la ciudad. En ese orden de ideas, se decide utilizar el modelo de agentes FRED [2], que incluye aspectos como la heterogeneidad entre grupos etarios, introducción de variantes biológicas en la ciudad, el potencial efecto de la vacunación masiva, desagregación espacial a nivel de localidades o UPZ, entre otros. Sin embargo, vale la pena mencionar que, dado que FRED es un modelo de alta complejidad computacional, muchas veces requiere de especificaciones de computo elevadas como lo pueden ser una memoria de por lo menos 25 GB RAM para cada simulación, un espacio aproximado de 4 GB por simulación, entre otros.

## 5. Resultados

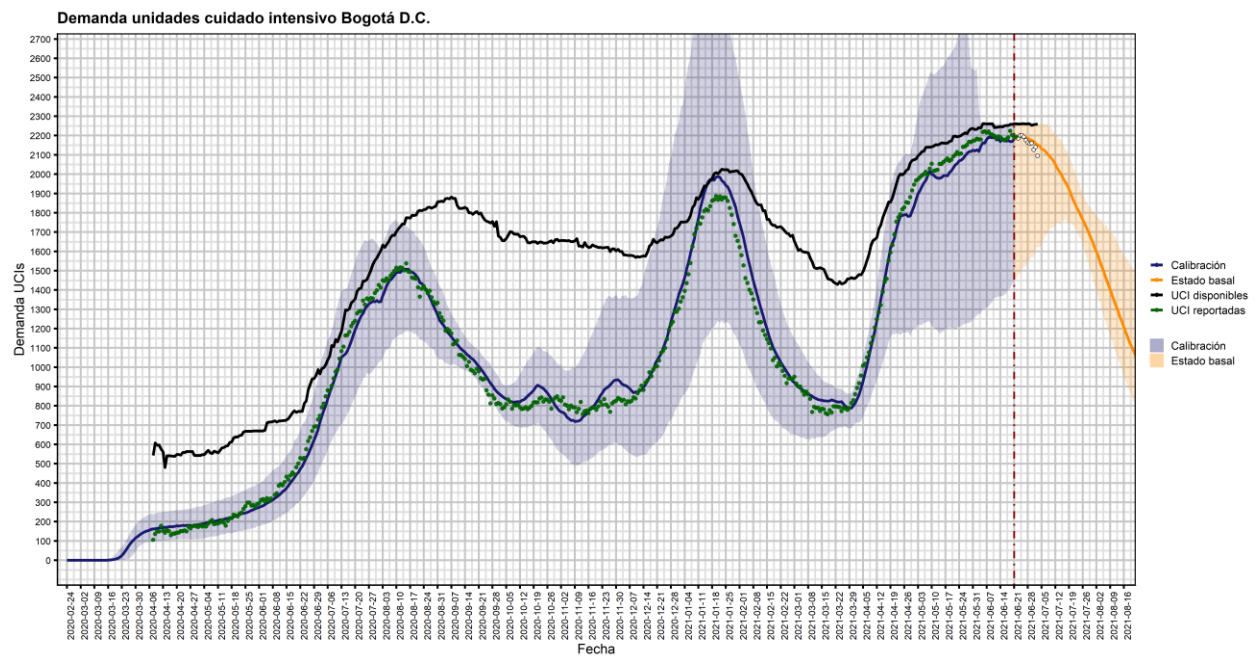
---

A partir de los procesos de calibración de ambos modelos se logra proyectar el estado basal del modelo mostrado en las figuras 1, 2, 3 y 4 para diferentes compartimentos y para cada uno de los dos modelos escogidos donde por razones del transcurso que ha tomado la pandemia en Bogotá, las proyecciones más actualizadas se hacen con el modelo FRED. En general, para ambos modelos se observa una buena calibración con los datos reportados por la SDS de tal manera que la franja de incertidumbre que contiene el 95% de las simulaciones contiene cada uno de los datos reportados. En la figura 1 se observa la demanda de camas de hospitalización general para el estado basal del modelo Squire calibrado hasta el 21 de junio de 2021. En la figura 2 se observa la demanda de camas de UCI para el estado basal del modelo Squire calibrado hasta el 21 de junio de 2021. De hecho, se observa en las figuras 1 y 2 una supresión temporal a finales de junio de 2021 que coincide con lo que se vivió en la ciudad en dicho periodo. Aquí vale la pena mencionar que en los picos de la pandemia se ha evidenciado una disminución en el tiempo de estancia en hospitalización general y UCI para pacientes con Covid-19. Por otra parte, en las figuras 3 y 4 se observan los fallecidos diarios y la demanda de camas de UCI para el estado basal del modelo FRED calibrado hasta el 14 de agosto de 2021. Es importante aclarar que estos resultados obtenidos con el modelo FRED son resultados preliminares y que siguen en revisión con diferentes expertos epidemiológicos.

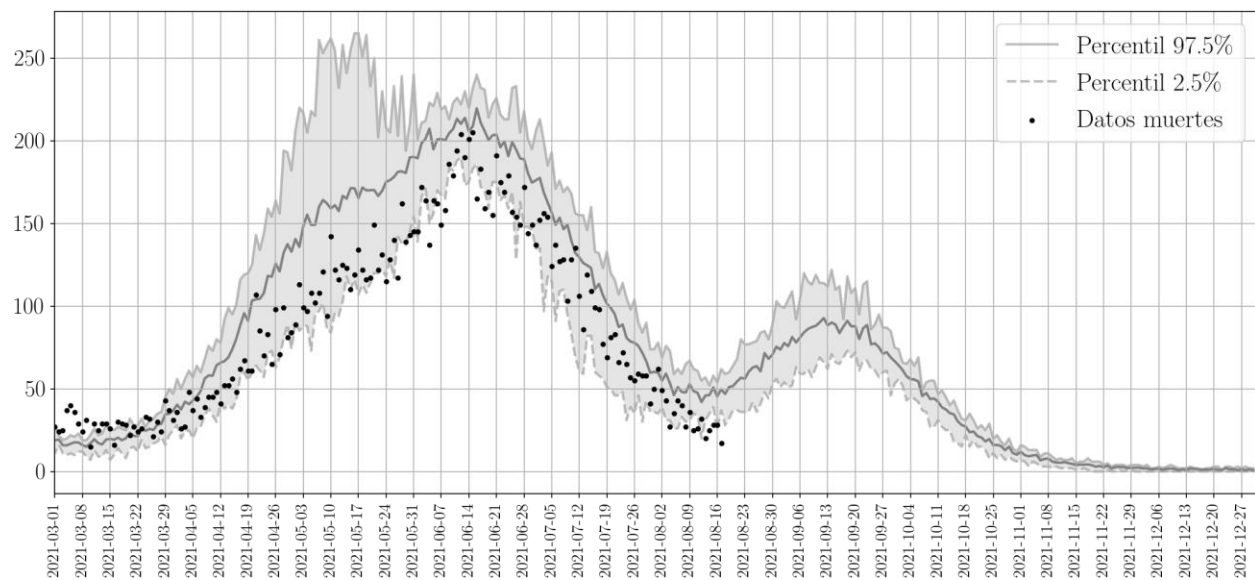
A partir de estos resultados del estado basal del modelo, se realizan proyecciones únicamente con el modelo FRED (que contempla la introducción de variantes biológicas) sobre dos potenciales escenarios que incluyan el potencial efecto de la introducción de la variante Delta en Bogotá a partir del 15 de mayo de 2021 (escenario Delta media) y 15 de junio de 2021 (escenario Delta tardía) mostrados en las figuras 5, 6, 7 y 8 para fallecimientos diarios y demanda de solicitudes de camas UCI. En todas las figuras se evidencia un potencial cuarto pico no tan severo como las 3 olas ya vividas en la ciudad, pero que se diferencia por el momento del año en que podría presentarse.



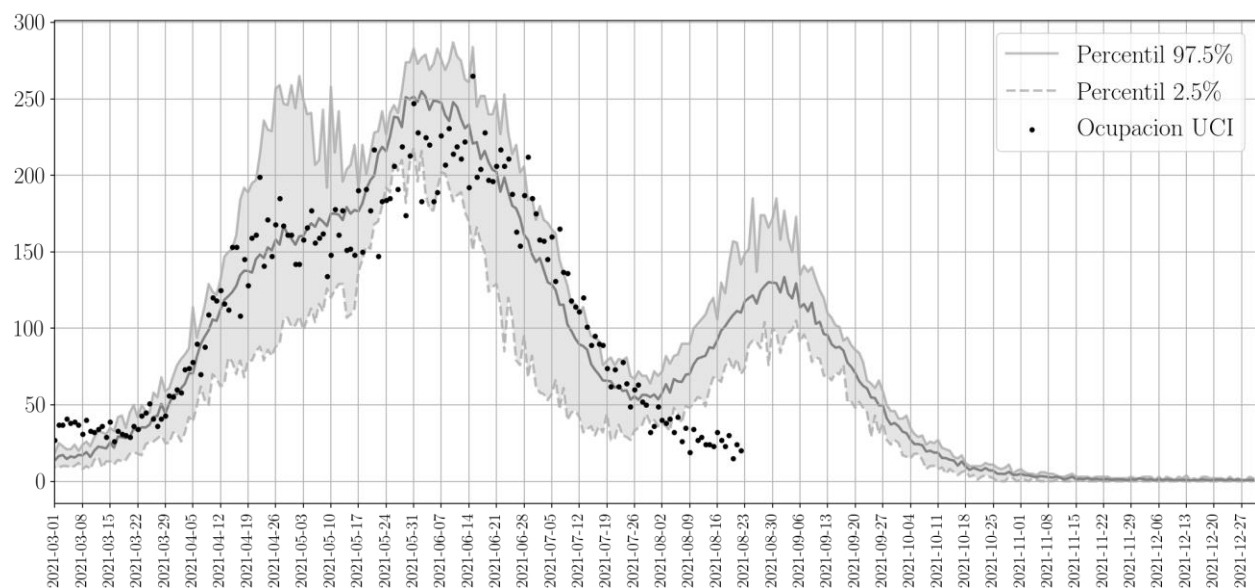
**Figura 1:** Demanda de camas de hospitalización general para el estado basal del modelo Squire calibrado hasta el 21 de junio de 2021.



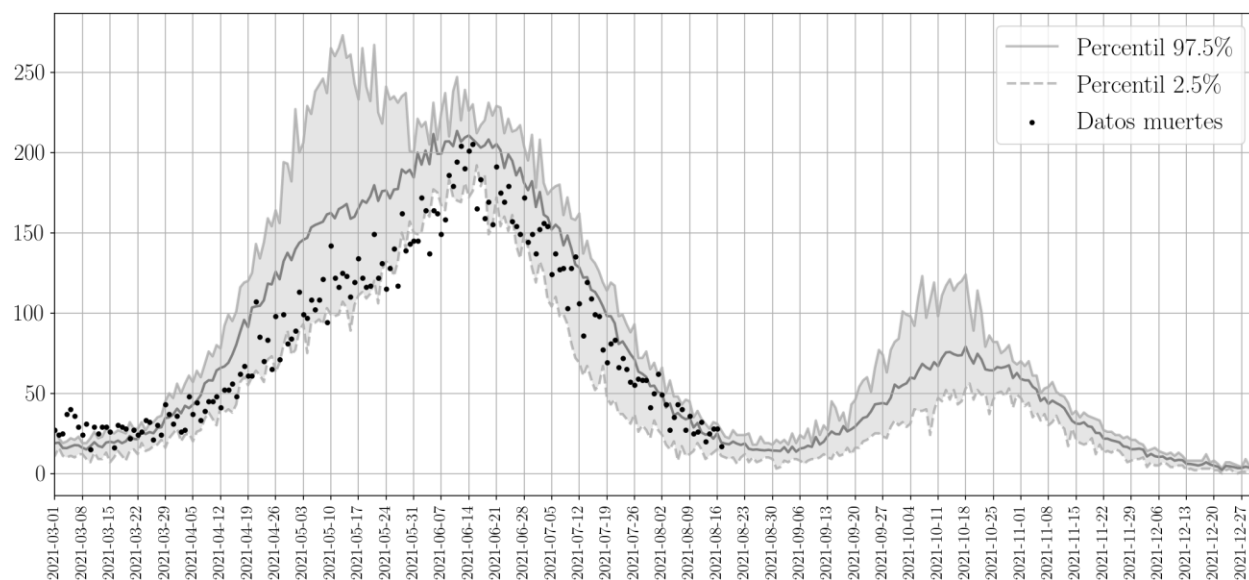
**Figura 2:** Demanda de camas de UCI para el estado basal del modelo Squire calibrado hasta el 21 de junio de 2021.



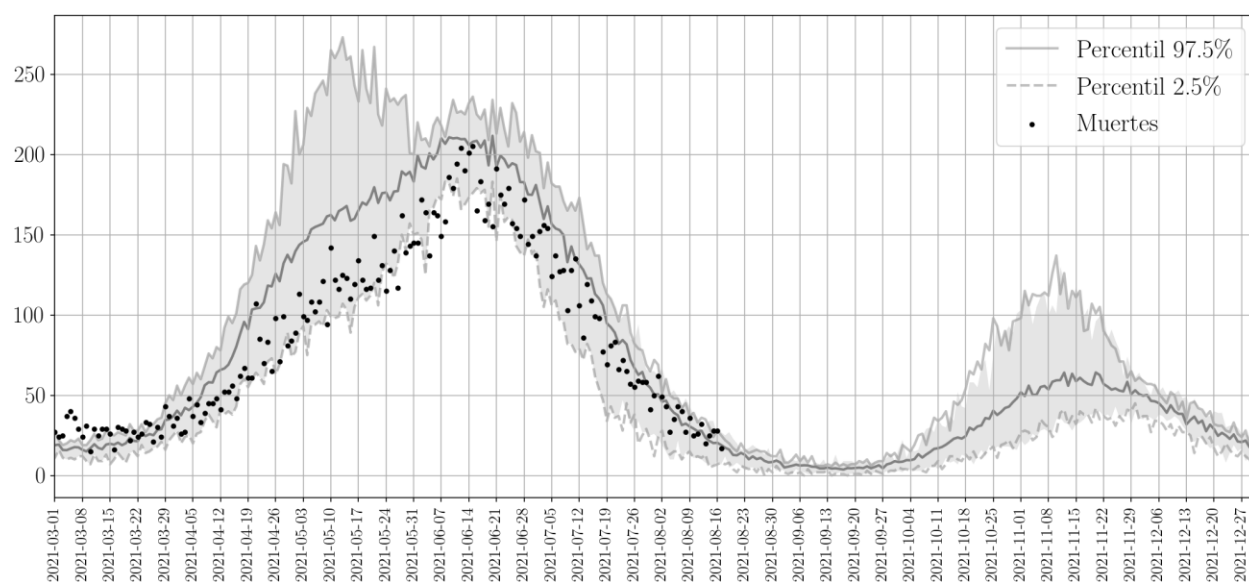
**Figura 3:** Fallecidos diarios para el estado basal del modelo FRED calibrado hasta el 14 de agosto de 2021.



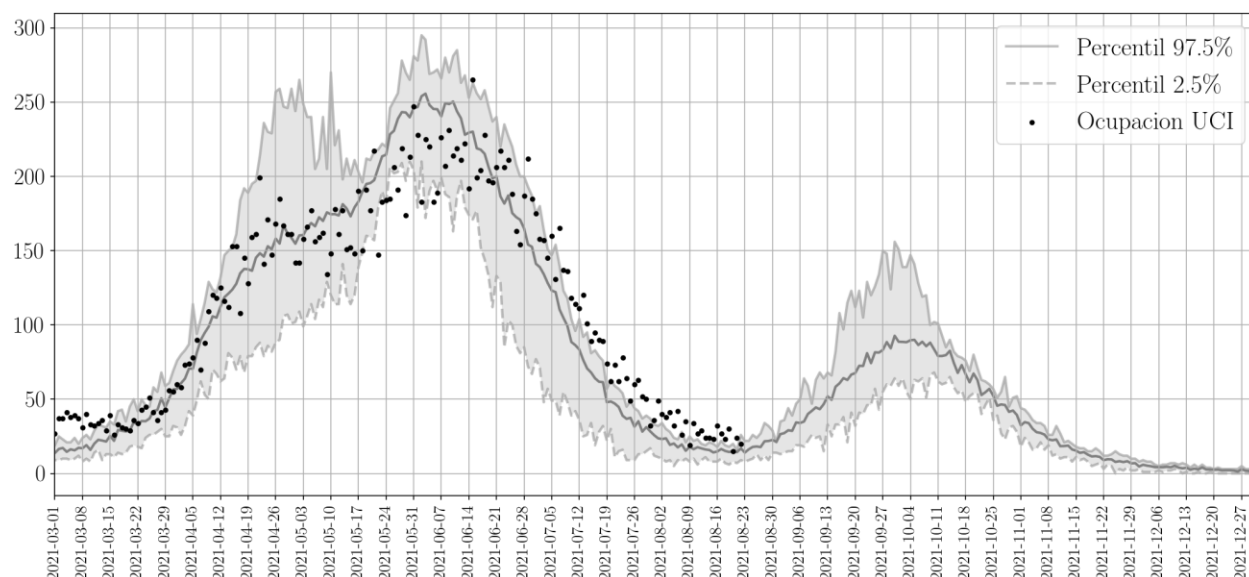
**Figura 4:** Demanda de camas de UCI para el estado basal del modelo FRED calibrado hasta el 14 de agosto de 2021.



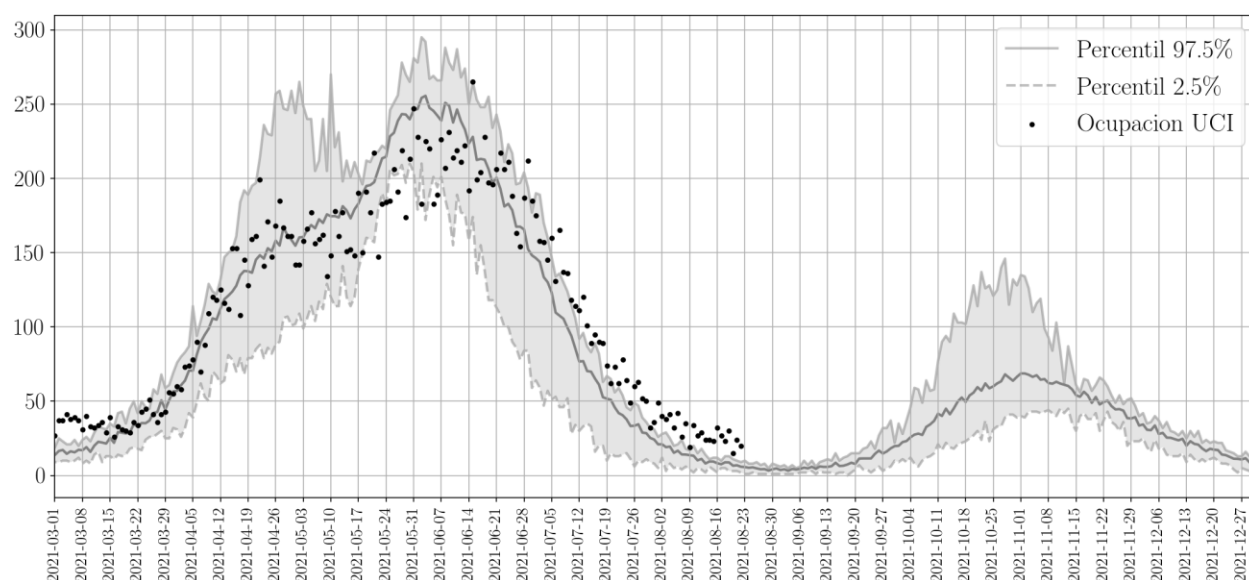
**Figura 5:** Proyección de fallecidos diarios para el escenario Delta media del modelo FRED calibrado hasta el 14 de agosto de 2021.



**Figura 6:** Proyección de fallecidos diarios para el escenario Delta tardía del modelo FRED calibrado hasta el 14 de agosto de 2021.



**Figura 7:** Proyección de solicitudes de camas UCI diarias para el escenario Delta media del modelo FRED calibrado hasta el 14 de agosto de 2021.



**Figura 8:** Proyección de solicitudes de camas UCI diarias para el escenario Delta tardía del modelo FRED calibrado hasta el 14 de agosto de 2021.

## 6. Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos, se puede evidenciar que cada uno de los dos modelos escogidos tiene ventajas y desventajas que deben ser considerados al momento de realizar cualquier tipo de proyección y posibles escenarios de proyección. Por ejemplo, es claro que con el modelo Squire que no contempla la introducción de variantes de variantes biológicas poseería problemas para proyectar la introducción de la variante Delta en la ciudad. Sin embargo, a partir

de este modelo se logra proyectar la demanda de camas de hospitalización general una vez se calibra correctamente el modelo.

Las proyecciones realizadas con el modelo FRED muestran que se podría presentar un potencial cuarto pico de Covid-19 en Bogotá entre los meses de octubre o noviembre de 2021 debido a la introducción de la variante Delta en la ciudad. Sin embargo, estos resultados preliminares deben seguir siendo evaluados para poder entender el escenario más factible de los anteriormente propuestos.

## 7. Referencias

---

- [1] G. T. Walker, C. Whittaker, O. J. Watson, et al. *The impact of covid-19 and strategies for mitigation and suppression in low- and middle-income countries*. Science, 369 413 (2020). DOI: <https://doi.org/10.1126/science.abc0035>.
- [2] J. J. Grefenstette, S. T. Brown, R. Rosenfeld, et al. *FRED (A Framework for Reconstructing Epidemic Dynamics): an open-source software system for modeling infectious diseases and control strategies using census-based populations*. BMC Public Health 13, 940 (2013). DOI: <https://doi.org/10.1186/1471-2458-13-940>.
- [3] B. Tang. *Orthogonal Array-Based Latin Hypercubes*. Journal of the American Statistical Association, 88:424 (1993), 1392-1397, DOI: <https://doi.org/10.1080/01621459.1993.10476423>.