

---

## Reporte Técnico II

### Proyecto CONACYT PINV20-40

*Simulación de modelos epidemiológicos para predicción y contingencia del COVID-19*

---

#### Equipo:

Eduardo, De los Santos; Carlos, Gaona; Miguel, García;  
Sebastián, Grillo; Sandra, Irala; Esther, Pedrozo;  
Pastor, Pérez-Estigarribia; Carlos, Sauer;  
Leticia, Segovia; Hyun Ho, Shin; Ricardo, Torales;  
José Luis, Vázquez; Silvia, Vázquez.

“La publicación se realizó en el marco del proyecto PINV20-40 cofinanciado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) con recursos del FEEI”

FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA  
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ASUNCIÓN

29 de junio de 2021

## Resumen

En este reporte se presentan los resultados parciales del proyecto CONACYT PINV20-40 de simulación de modelos epidemiológicos para predicción y contingencia del COVID-19. El proyecto tiene como objetivo simular modelos epidemiológicos que permitan prever los efectos del COVID-19 en función a posibles acciones en Paraguay. En este escrito, se describe el modelo empleado para simular, la dinámica de propagación de la enfermedad COVID-19 en Paraguay, con las estimativas del uso de recursos hospitalarios. El modelo consiste en compartimientos basados en ecuaciones diferenciales ordinarias, que incluyen las ocupaciones de internaciones generales y de unidades de cuidados intensivos para la estimación de recursos hospitalarios.

En particular, en este reporte se presenta un análisis de la transmisibilidad que fue estimada en el reporte anterior. Se presentan la identificación de escenarios, y la metodología para obtener las proyecciones usando los escenarios identificados. También, se presentan los resultados de las simulaciones de escenarios identificados, con sus análisis cualitativos y cuantitativos.

Los escenarios con suposición de valores constantes de parámetros producen mayores errores a medida se alarga la ventana de proyecciones. Esto es inevitable debido al comportamiento variable de los parámetros. Así, es necesaria la actualización continua de los parámetros y sus proyecciones a corto plazo.

**Palabras Claves:** Modelo Epidemiológico, COVID-19, Transmisibilidad, Aplicación Web, Usabilidad de Aplicación.

# Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Objetivos</b>	<b>1</b>
2.1. Objetivo General . . . . .	1
2.2. Objetivos Específicos . . . . .	1
2.3. Organización del Reporte . . . . .	1
<b>3. Marco Teórico: Modelo Matemático</b>	<b>1</b>
3.1. Dinámica de la transmisión . . . . .	3
3.1.1. Número de Reproducción . . . . .	3
3.2. Dinámica de los recursos en los hospitales . . . . .	5
<b>4. Escenarios y proyecciones.</b>	<b>6</b>
4.1. Identificación de escenarios . . . . .	6
4.2. Metodología para obtener la proyección . . . . .	7
<b>5. Resultados y discusiones</b>	<b>8</b>
5.1. Simulación de escenarios . . . . .	8
<b>6. Conclusión</b>	<b>12</b>
<b>Agradecimiento</b>	<b>12</b>
<b>Declaración</b>	<b>12</b>
<b>Referencias</b>	<b>12</b>
<b>A. Actividades del proyecto</b>	<b>14</b>

## 1. Introducción

Este reporte es una continuación del reporte anterior. Básicamente, se utiliza el modelo y la metodología, como también de los resultados presentados en el reporte anterior. Así, en este reporte, se usa extensamente el parámetro de transmisibilidad  $\beta$ . En base al análisis de la variabilidad de este parámetro, se identifican posibles escenarios que podrán ser usados en la simulación de proyecciones. Posteriormente, se procede a la simulación de los escenarios analizando su error de forma cualitativa y cuantitativa.

## 2. Objetivos

### 2.1. Objetivo General

El proyecto tiene como objetivo general, simular modelos epidemiológicos que permitan prever los efectos del COVID-19 en función a posibles acciones en Paraguay.

### 2.2. Objetivos Específicos

En este trabajo se proponen los objetivos específicos que se citan a continuación.

1. Simular y comparar posibles modelos de COVID-19 en relación a estadísticas existentes del COVID-19.
2. Proyectar valores posibles de infectados, casos graves y muertos por COVID-19 en Paraguay a partir de las tendencias.
3. Identificar posibles políticas y sus efectos sobre la propagación del COVID-19 en Paraguay.
4. Estimar la cantidad de recursos necesarios para enfrentar al COVID-19 en Paraguay en función a cada política identificada.
5. Desarrollar una plataforma web que actualice proyecciones del COVID-19 de forma diaria.

### 2.3. Organización del Reporte

Este reporte técnico se organiza de la siguiente manera. En la Sección 3 se presenta el modelo propuesto. La Sección 4 presenta un análisis de la transmisibilidad que se ha mostrado en Paraguay y escenarios posibles en función a esta. La Sección 5 presenta simulaciones a partir de los escenarios de transmisibilidad y sus análisis. La Sección 6 presenta las conclusiones obtenidas a partir del trabajo. Finalmente en el Anexo A se detalla la manera que este reporte es un medio de verificación para las tareas del plan de trabajo correspondientes a los ítems 6 y 7 del proyecto.

## 3. Marco Teórico: Modelo Matemático

El modelo SEIR-H es un modelo compartamental basado en ecuaciones diferenciales ordinarias. Para la dinámica de propagación de COVID-19, el modelo SEIR-H es casi idéntico al modelo SEIR clásico, con la diferencia de que en el modelo propuesto, el grupo  $R$  representa a los

reportados, que son diagnosticados como casos positivos confirmados. Este grupo reportado se divide principalmente en tres grupos (i)  $H$ : grupo de hospitalizados, compuesto por individuos que presentan síntomas graves, y que por lo tanto son hospitalizados, (ii)  $U$ : grupo compuesto por individuos que ingresan en la UCI debido al empeoramiento de los síntomas, y (iii)  $F$ : fallecidos. Así, el modelo SEIR-H se divide en dos partes que representan dos dinámicas: (i) la dinámica de propagación/transmisión de la enfermedad, y (ii) la dinámica del uso de las camas de hospital. En este modelo, la dinámica de los recursos hospitalarios no afecta a la dinámica de propagación de la enfermedad, es decir, los compartimentos  $S$ ,  $E$ ,  $I$ ,  $R$  no están influidos por  $H$ ,  $U$  y  $F$ . Esta suposición es razonable en el sentido de que las transmisiones de la enfermedad desde los pacientes hospitalizados de COVID-19 son insignificantes en comparación con las transmisiones que se producen en la comunidad fuera de los hospitales.

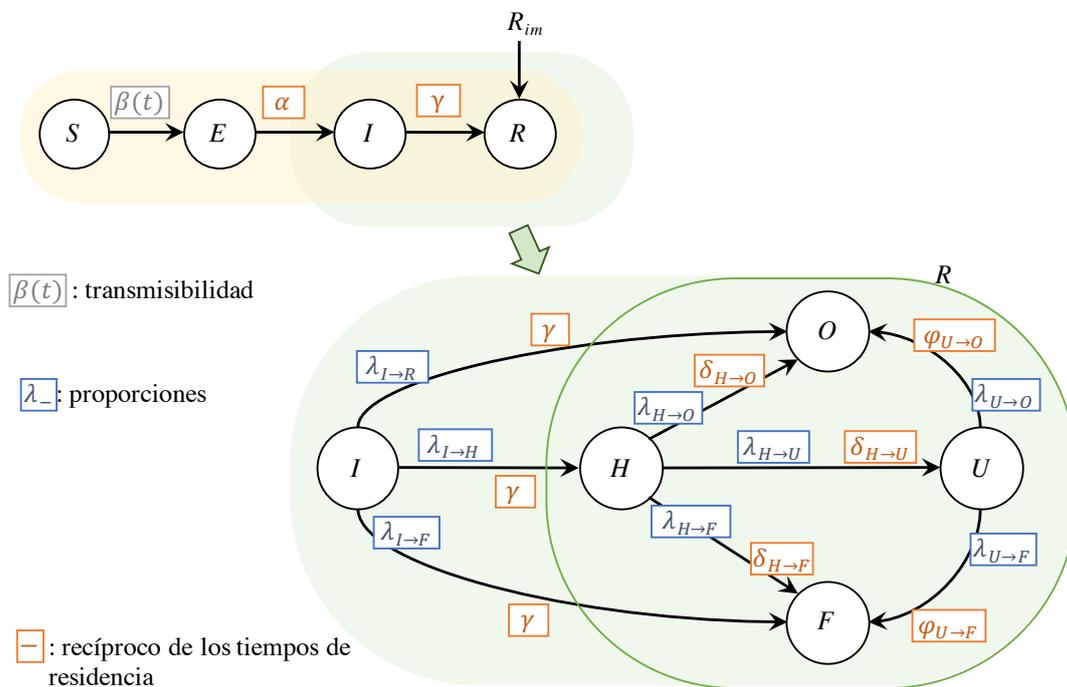


Figura 1: Diagramas esquemáticos del modelo SEIR-H: la región en amarillo indica la dinámica de transmisión dada por SEIR con los reportes de casos externos, y la región en verde representa la dinámica relacionada con los recursos hospitalarios. Una versión más detallada de la región en verde sirve para mostrar que el compartimento  $R$  contiene la dinámica relacionada con el sistema sanitario representado principalmente por  $H$ ,  $U$  y  $F$ .

La figura 1 ilustra esquemáticamente el modelo SEIR-H propuesto. Se destacan las dos partes del modelo (i) la dinámica de propagación con fondo amarillo y (ii) la dinámica de los casos notificados con fondo verde. Los parámetros en azul están asociados a las proporciones de individuos que se mueven de un compartimento a otro, y los parámetros en naranja están asociados al recíproco de la duración media de la estancia en cada compartimento. En las siguientes subsecciones se discuten en detalle ambas partes presentando los sistemas de ecuaciones diferenciales junto con las definiciones de los parámetros.

### 3.1. Dinámica de la transmisión

La dinámica de propagación de la enfermedad, resaltada en amarillo en la Figura 1, es similar al modelo SEIR (Hethcote, 2000), dada por:

$$\frac{dS}{dt} = -\beta \frac{S}{N} I, \quad (1)$$

$$\frac{dE}{dt} = \beta \frac{S}{N} I - \alpha E, \quad (2)$$

$$\frac{dI}{dt} = \alpha E - \gamma I, \quad (3)$$

$$\frac{dR}{dt} = \gamma I + R_{im}. \quad (4)$$

En este modelo, las ecuaciones (1), (2), (3) y (4), respectivamente, muestran la dinámica de los compartimentos de: los susceptibles  $S$ , los expuestos  $E$ , los infecciosos  $I$  y los reportados  $R$ . El término  $R_{im}$  representa la tasa de casos reportados por los viajeros, que fue relevante al inicio de la dinámica de COVID-19 en Paraguay<sup>1</sup>.

El grupo susceptible  $S$  representa a quienes aún no han contraído la enfermedad y podrían hacerlo en el futuro. El grupo expuesto  $E$  representa a los que estuvieron expuestos a la infección, y ya han sido infectados, pero se encuentran en una etapa de latencia en la que aún no son capaces de infectar a otros.

El compartimento infeccioso  $I$  representa a los individuos que son contagiosos, y los diagnosticados como casos positivos confirmados de COVID-19 se incluyen en el compartimento  $R$ . En el modelo SEIR clásico, el compartimento  $R$  se asocia a los que se recuperan o se retiran de la dinámica después de un tiempo determinado. En este trabajo, el compartimento  $R$  también tiene el significado de removido, dado el supuesto de que los que son reportados también son aislados y eliminados de la dinámica de transmisión. Sin embargo, dado que  $R$  se ajustará a las confirmaciones oficialmente positivas, lo renombramos como el compartimento reportado. La población  $N$ , que es constante, está formada por la suma de estos cuatro compartimentos:  $N = S(t) + E(t) + I(t) + R(t)$ .

En este modelo aparecen tres parámetros: (i)  $\beta(t)$  es la tasa a la que los individuos susceptibles adquieren la enfermedad, también conocida como transmisibilidad, que en este trabajo depende del tiempo, (ii)  $\alpha$  es la tasa a la que un individuo expuesto se vuelve infeccioso, también definida como el recíproco del periodo medio de latencia, y (iii)  $\gamma$  es la tasa a la que un individuo infeccioso se reporta, expresada como el recíproco del tiempo medio que un individuo permanece contagioso a otros individuos. Cuadro 1 muestra los parámetros del modelo SEIR-H, junto con sus descripciones y valores, y si se consideran constantes o dependientes del tiempo.

#### 3.1.1. Número de Reproducción

La dinámica de la transmisión de enfermedades puede expresarse mediante un único parámetro denominado número de reproducción  $R_0$ . Este número puede definirse como el número esperado de casos secundarios que surgen tras introducir un individuo infeccioso en una población

<sup>1</sup>[http://vigisalud.gov.py/page/#vista\\_boletines\\_covid19.html](http://vigisalud.gov.py/page/#vista_boletines_covid19.html)

Cuadro 1: Parámetros del modelo SEIR-H

Parámetros	Descripción	Tipo*	Valores**
$\beta$	Transmisibilidad.	D-T	Est.
$\alpha$	Recíproco de periodo medio de latencia.	C	1/3
$\gamma$	Recíproco del periodo infeccioso medio.	C	1/7
$\lambda_{I \rightarrow H}$	Proporción de infectados que son hospitalizados.	D-T	Est.
$\lambda_{I \rightarrow F}$	Proporción de infectados que fallecen.	D-T	Est.
$\lambda_{H \rightarrow U}$	Proporción de hospitalizados que ingresan en la UCI.	D-T	Est.
$\lambda_{H \rightarrow F}$	Proporción de hospitalizados que fallecen.	D-T	Est.
$\lambda_{U \rightarrow F}$	Proporción de admitidos en la UCI que fallecen.	D-T	Est.
$\delta_{H \rightarrow U}$	Recíproco de la estancia media en la cama del hospital antes del ingreso en la UCI.	C	1/7
$\delta_{H \rightarrow F}$	Recíproco de la estancia media en la cama del hospital antes del deceso.	C	1/9
$\delta_{H \rightarrow O}$	Recíproco del periodo medio de recuperación en la cama del hospital.	C	1/11
$\varphi_{U \rightarrow F}$	Recíproco de la estancia media en la UCI antes del deceso.	C	1/11
$\varphi_{U \rightarrow O}$	Recíproco del periodo medio de recuperación en la UCI.	C	1/12

\* D-T: Dependiente del Tiempo; C: Constante.

\*\* Est.: indica que los valores se estimarán; todos los períodos de tiempo en esta tabla se consideran en días.

susceptible. Este número de reproducción es útil para definir un umbral que debe mantenerse durante un tiempo determinado, para que la epidemia persista ( $R_0 > 1$ ), o se extinga ( $R_0 < 1$ ) [Hethcote \(2000\)](#); [Delamater et al. \(2019\)](#); [Smith et al. \(2011\)](#).

El número de reproducción se ve afectado por diversos factores biológicos, socio-comportamentales y ambientales ([Delamater et al., 2019](#)). El valor numérico depende del método de estimación, y el valor específico obtenido a partir de los modelos matemáticos basados en ecuaciones diferenciales debe entenderse como un umbral más que como el número de casos secundarios ([Smith et al., 2011](#)). El valor numérico puede considerarse en función de tres parámetros: la duración del periodo infeccioso, la probabilidad media de transmisión del virus en cada contacto y la tasa media de contactos ([Delamater et al., 2019](#)).

El número de reproducción del modelo SEIR clásico puede expresarse en términos de los parámetros  $\beta$  y  $\gamma$ , de la siguiente manera:

$$R_0 = \frac{\beta}{\gamma}. \quad (5)$$

A medida que la propagación de la enfermedad evoluciona, el número de individuos susceptibles disminuye monótonamente. Así, el número en el que efectivamente funciona como umbral epidémico es:

$$R_e(t) = \frac{\beta(t) S(t)}{\gamma N}, \quad (6)$$

también conocido como el número de reproducción efectivo.

A partir de estas ecuaciones, se observa que el valor del número de reproducción  $R_0$  o  $R_e(t)$  puede alterarse mediante intervenciones sobre los parámetros  $\beta$  y  $\gamma$ . Las medidas de

contención y distanciamiento social pueden afectar al parámetro  $\beta$ , al reducir la tasa media de contactos. Por otro lado, las recomendaciones de higiene y el uso adecuado de mascarillas también pueden afectar a  $\beta$ , al reducir la probabilidad media de transmisión del virus en cada contacto. Mientras que el parámetro  $\gamma$  depende de la propia enfermedad, puede modificarse mediante un aislamiento temprano efectivo de los individuos infectados.

### 3.2. Dinámica de los recursos en los hospitales

La dinámica de los casos reportados, resaltada en verde en la Figura 1, se centra principalmente en el número de individuos reportados que necesitan hospitalizaciones generales y Unidades de Cuidados Intensivos (UCI). Por lo tanto, es importante analizar la proporción de los individuos infectados que desarrollan casos graves de la enfermedad, así como la tasa de letalidad.

Se considera un modelo compartamental: (i) el compartimento  $H$  incluye la hospitalización general de los pacientes con COVID-19, (ii) el compartimento  $U$  incluye a todos aquellos individuos reportados que requieren UCI, y (iii) el compartimento de los fallecidos  $F$ .

Las ecuaciones que describen la dinámica en los hospitales pueden expresarse como sigue:

$$\frac{dH}{dt} = \lambda_{I \rightarrow H} \gamma I - \lambda_{H \rightarrow U} \delta_{H \rightarrow U} H - \lambda_{H \rightarrow F} \delta_{H \rightarrow F} H - \lambda_{H \rightarrow O} \delta_{H \rightarrow O} H, \quad (7)$$

$$\frac{dU}{dt} = \lambda_{H \rightarrow U} \delta_{H \rightarrow U} H - \lambda_{U \rightarrow F} \varphi_{U \rightarrow F} U - \lambda_{U \rightarrow O} \varphi_{U \rightarrow O} U, \quad (8)$$

$$\frac{dF}{dt} = \lambda_{I \rightarrow F} \gamma I + \lambda_{H \rightarrow F} \delta_{H \rightarrow F} H + \lambda_{U \rightarrow F} \varphi_{U \rightarrow F} U. \quad (9)$$

La dinámica de la porción de individuos infectados que desarrollan casos graves y necesitan ser hospitalizados, se representa en la ecuación (7), mediante un parámetro  $\lambda_{I \rightarrow H}$ . Una parte de los hospitalizados, dada por el parámetro  $\lambda_{H \rightarrow U}$ , requiere cuidados intensivos. La duración media de la estancia en una cama normal antes de requerir una unidad de cuidados intensivos viene dada por  $1/\delta_{H \rightarrow U}$ . Por otro lado, los individuos hospitalizados mueren con una porción  $\lambda_{H \rightarrow F}$  con una estancia media en el hospital de  $1/\delta_{H \rightarrow F}$ . El resto de la porción  $\lambda_{H \rightarrow O}$  se recupera con una estancia media en el hospital de  $1/\delta_{H \rightarrow O}$ .

La ecuación (8) representa la dinámica de la ocupación de la UCI. El ingreso en la UCI se restringe a los individuos con casos graves que son hospitalizados inicialmente en camas normales. La porción de individuos de la UCI que fallecen está dada por  $\lambda_{U \rightarrow F}$ , con una estancia media en UCI de  $1/\varphi_{U \rightarrow F}$ . El compartimento recuperado es  $\lambda_{U \rightarrow O} = 1 - \lambda_{U \rightarrow F}$ , con una estancia media en UCI de  $1/\varphi_{U \rightarrow O}$ .

El último compartimento corresponde a la acumulación de fallecidos dada por la ecuación (9). Aquí se incluyen los fallecidos de los hospitalizados y también los que estaban en la UCI. Además, una parte de los reportados dada por  $\lambda_{I \rightarrow F}$  muere sin haber ingresada en los hospitales.

En Figura 1, el compartimento  $O$  corresponde a los que se recuperan del COVID-19. En este trabajo, no hacemos un seguimiento del recuento de individuos recuperados, porque los datos de los recuperados son poco fiables. Por lo tanto, se omite la ecuación para este compartimento.

## 4. Escenarios y proyecciones.

### 4.1. Identificación de escenarios

En esta subsección realizaremos un análisis descriptivo de la transmisibilidad considerando los cuartiles de los promedios semanales en un mes y las variaciones porcentuales correspondientes. Con este análisis, definiremos escenarios en función a: (i) reducciones porcentuales de transmisibilidad, y (ii) reducciones de transmisibilidad en función a la frecuencia de sus variaciones.

El objetivo de este análisis es determinar el grado de reducciones porcentuales de transmisibilidad son realistas sin intervenciones tan estrictas como la se realizó al inicio de la pandemia en Paraguay. Los valores de transmisibilidad diarios usados son del 25 de junio al 31 de diciembre del 2020 y son calculados por medio del modelo y metodología presentadas en el reporte anterior. El análisis de transmisibilidad presenta dos dificultades principales: (i) el error de registro de casos reportados que pueden corresponder a múltiples días distintos y produce algún grado de ruido; (ii) variaciones de transmisibilidad no dependientes directamente de factores humanos como variaciones del virus o el clima, lo que dificulta la comparación entre distintos periodos del año. Sea la transmisibilidad  $\beta(t_j)$  correspondiente al día  $t_j$ , denotamos la media de la transmisibilidad de la semana previa al día  $i$ :

$$\tilde{\beta}(t_j) = \frac{1}{7} \sum_{k=0}^6 \beta(t_j + k). \quad (10)$$

Al emplear una versión suavizada de la transmisibilidad reducimos el efecto del ruido en los registros de reportados. Una vez calculada la media de la transmisibilidad de la semana previa del 1 de julio al 31 de diciembre, se calcula el cambio porcentual de  $\tilde{\beta}$  para cada día en relación con el promedio de  $\tilde{\beta}$  para ese mismo mes. Por lo tanto obtenemos un análisis independiente para cada mes. Al realizar comparaciones de  $\tilde{\beta}$  dentro de un mismo mes, evitamos que los factores externos al ser humano tengan suficiente tiempo para influir la tendencia de la transmisibilidad.

El Cuadro 2 presenta el máximo, mínimo, primer cuartil, tercer cuartil, mediana y diferencia máxima (máximo – mínimo) para el  $\tilde{\beta}$  de los meses de julio, agosto, setiembre, octubre, noviembre y diciembre. Se puede observar que un escenario del 10% de reducción de transmisibilidad es alcanzado por los mínimos de julio, agosto, noviembre y diciembre; además de ser alcanzado por el primer cuartil de agosto y diciembre. Por lo tanto una reducción del 10% es un nivel alcanzable bajo medidas no excepcionales. En cambio un escenario del 10% de incremento de transmisibilidad es alcanzado por todos los máximos excepto el de noviembre, además de ser alcanzado por el tercer cuartil de julio y agosto. Por lo tanto un 10% de incremento de transmisibilidad es un evento común, aunque no el peor porque en dos meses se han registrado máximos del 20% de incremento.

A partir del primer cuartil podemos calcular restricciones que por lo menos se cumplan el 25% del tiempo. En el Cuadro 2 se observa que el 25% del tiempo se pudo mantener una restricción de al menos 3,3% de transmisibilidad o inclusive un 10,1%, durante la segunda mitad del 2020 en relación al propio mes. Del mismo modo, con el tercer cuartil podemos calcular relajamientos que se cumplan el 25% del tiempo. El 25% mas relajado de la segunda mitad del 2020 llego a incrementos de transmisibilidad de por lo menos 3,1% a 11,3%, en relación

Cuadro 2: Estadísticas mensuales para la media de la transmisibilidad semanal.

	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.
Mínimo	-0,131	-0,133	-0,070	-0,067	-0,148	-0,162
Cuartil 1	-0,082	-0,101	-0,040	-0,044	-0,033	-0,125
Mediana	-0,052	-0,054	-0,017	-0,002	0,026	0,041
Cuartil 3	0,113	0,112	0,049	0,031	0,043	0,083
Máximo	0,201	0,178	0,143	0,114	0,057	0,232
Diferencia	0,332	0,311	0,212	0,181	0,206	0,394

al mes de referencia. La definición misma de cuartil hace que tanto el primer como el tercer cuartil definido en una ventana de un mes sean escenarios probables, independientemente de los valores que se representen. El análisis realizado se efectuó en ventanas de un mes, sin embargo los escenarios pueden generalizarse a otras ventanas de tiempo a la hora de realizar simulaciones. En ese sentido podemos definir también un escenario donde la transmisibilidad no varía a partir de la ventana de tiempo. Por lo tanto describimos los siguientes escenarios probables a partir de una ventana de tiempo arbitraria, durante fases donde no ocurran restricciones muy estrictas:

- Status quo: transmisibilidad inalterada.
- Restricción leve, reducción del 10 % en transmisibilidad.
- Relajamiento leve, incremento del 10 % en transmisibilidad.
- Primer cuartil, el 25 % del tiempo más restringido.
- Tercer cuartil, el 25 % del tiempo más relajado.

## 4.2. Metodología para obtener la proyección

Para la proyección a partir del tiempo  $t_{j+W}$  ( $W = 14$ ), se utiliza una función Sigmoide, donde el rango va desde el valor del parámetro en  $t_j$  hasta un valor  $\beta_{\text{proj}}$ , con el ancho de variación de aproximadamente  $W/2 = 7$  días a partir de  $t_{j+W}$ . Para el parámetro de transmisibilidad, la mencionada función Sigmoide puede expresarse como

$$\beta_{\text{proj}}^{t_j}(t) = \beta_{\text{proj}} + \frac{\beta(t_j) - \beta_{\text{proj}}}{1 + \exp\left(\frac{W-2}{W}(t-W) - \frac{W}{4}\right)} \quad \text{for } t \geq t_{j+W}, \quad (11)$$

donde  $\beta_{\text{proj}}$  es el valor que se obtiene suponiendo uno de los escenarios descritos en la sección anterior.

- Status quo:  $\beta_{\text{proj}} = \beta(t_j)$ .
- Restricción leve:  $\beta_{\text{proj}} = 0,9 \beta(t_j)$ .
- Relajamiento leve:  $\beta_{\text{proj}} = 1,1 \beta(t_j)$ .
- Primer cuartil:  $\beta_{\text{proj}} = \beta_{Q1}$ , tal que  $\text{CDF}(\beta(t) < \beta_{Q1}) = 0,25$  con  $t \leq t_j$ , donde CDF es la función de distribución acumulada.
- Tercer cuartil:  $\beta_{\text{proj}} = \beta_{Q3}$ , tal que  $\text{CDF}(\beta(t) < \beta_{Q3}) = 0,75$  con  $t \leq t_j$ .

Para evaluar la proyección del modelo, se calcula la desviación del error relativo entre los datos y los resultados de la simulación. Para ello, el error relativo entre los datos y los resultados

de la simulación en el momento  $t_j$  se define como:

$$\text{rel\_error}_X(t_j) = \frac{D(t_j) - X(t_j)}{X(t_j)}, \quad (12)$$

donde  $X$  es solo una representación de cualquier resultado de la simulación, ya sea de la notificación diaria, de la hospitalización, de la UCI o de la muerte diaria con cierto escenario de proyección. Así, la desviación del error relativo se expresa como:

$$\text{dev\_rel\_error}_X = \sqrt{\frac{1}{W + W_{\text{proj}}} \sum_{k=0}^{W+W_{\text{proj}}} \text{rel\_error}_X(t_k)^2}. \quad (13)$$

## 5. Resultados y discusiones

En esta sección se muestran los resultados de los escenarios que hubiese obtenido en ciertas fechas en el pasado, y sus comparaciones con los datos que efectivamente se observaron. También, se presentan los análisis tanto cualitativos y cuantitativos de las proyecciones.

### 5.1. Simulación de escenarios

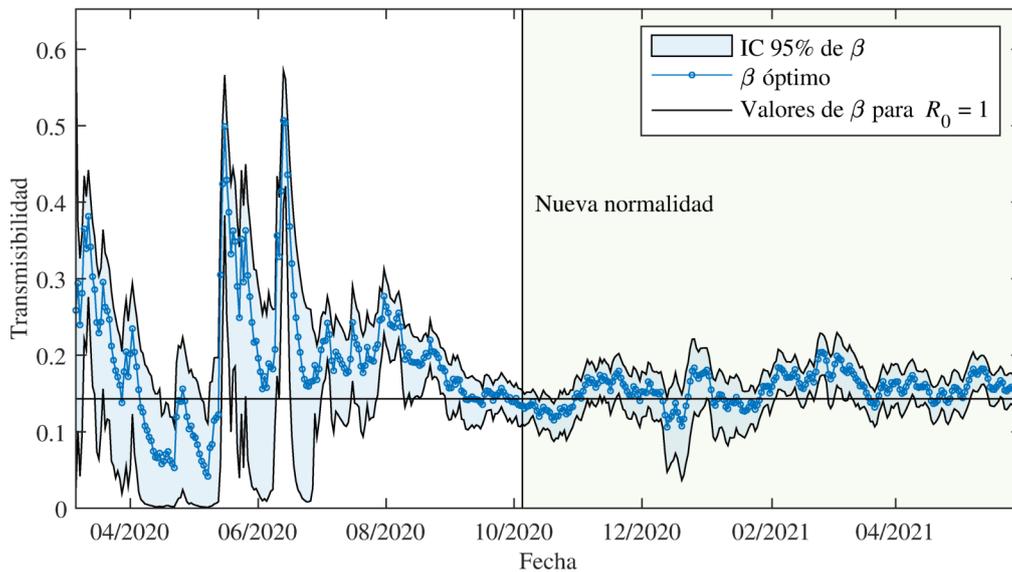


Figura 2: Transmisibilidad

Figura 2 muestra la transmisibilidad estimada en Paraguay desde el primer día con caso positivo confirmado. Además, Figura 3 muestra las proporciones estimadas. Estos gráficos se utilizarán para realizar el análisis cualitativo de los resultados de las proyecciones.

Con los datos que diariamente se van agregando, se obtienen nuevos parámetros estimativos. Así, al agregar datos del día  $t_{j+W}$ , se obtiene el valor del parámetro del día  $t_j$ . De este modo, se obtendrá un nuevo conjunto de proyecciones de escenarios. Si se presentan variaciones

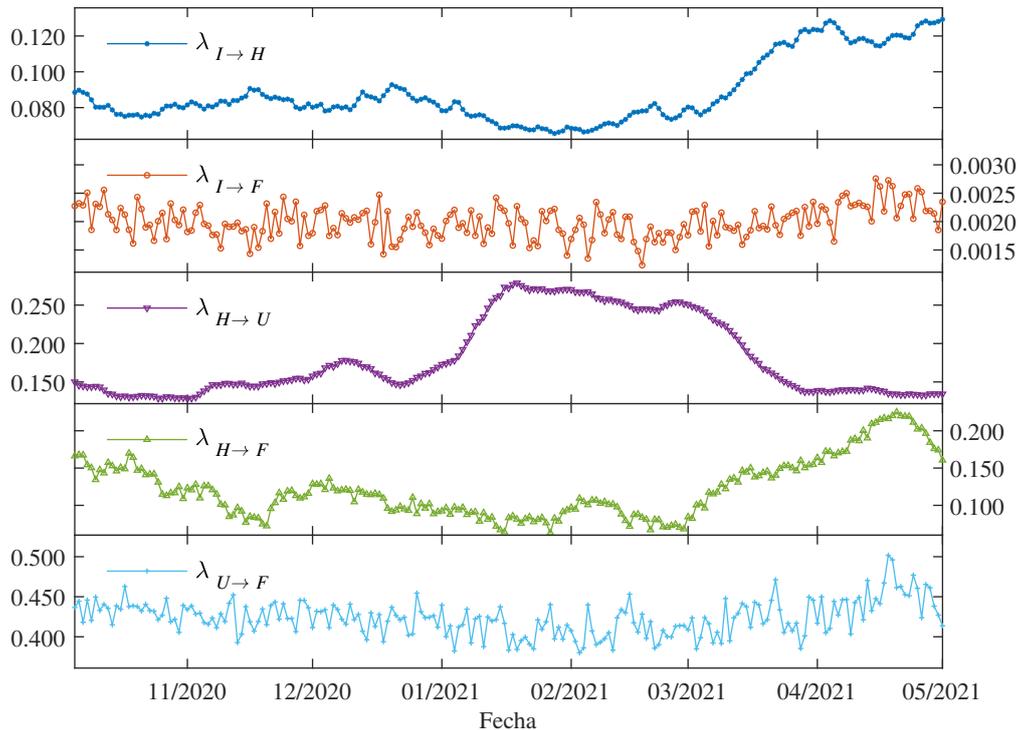


Figura 3: Proporciones

en el comportamiento de la sociedad posterior al día  $t_{j+W}$ , las estimaciones se alejarán del status quo.

La Figura 4 muestra las simulaciones de escenarios usando el parámetro estimado con los datos hasta la fecha  $t_{j+W} = 1$  de noviembre de 2020. Esto es, los parámetros estimados corresponden al de la fecha  $t_j = 18$  de octubre del 2020, utilizando datos del  $t_{j+1} = 19$  de octubre al  $t_{j+W} = 1$  de noviembre. Se observa que la transmisibilidad se sitúa en valores correspondientes al intermedio entre las proyecciones de primer y tercer cuartil, y ligeramente por encima del valor de transmisibilidad con número de reproducción mayor a la unidad. A la fecha de 19 de octubre, el primer cuartil se ubica por encima del status quo y el tercer cuartil bastante por encima. La restricción leve tiene valor ligeramente por debajo del escenario proyección, y la relajación leve, ligeramente por encima. En los primeros 10 días a partir del día de proyección (2 de noviembre) los datos de los posibles reportados diarios observados siguen bastante al escenario del tercer cuartil. Luego, hay una reducción de transmisibilidad respecto del tercer cuartil, produciendo posibles reportados con valor inferior al escenario del tercer cuartil. En los posibles hospitalizados o internados en UCI sigue mayormente al escenario del tercer cuartil. Los posibles fallecidos diarios sigue el conjunto de proyecciones de escenario status quo, restricción leve, relajación leve y el primer cuartil que son bastantes similares.

El Cuadro 3 muestra la desviación del error relativo de las proyecciones mostradas en la Figura 4. Cuantitativamente, los escenarios de tercer cuartil y relajamiento leve presentan errores menores con los datos observados. Esto significa que, a partir del 2 de noviembre, se ve relajamiento en el comportamiento de la sociedad.

La Figura 5 muestra las simulaciones de escenarios usando el parámetro estimado con

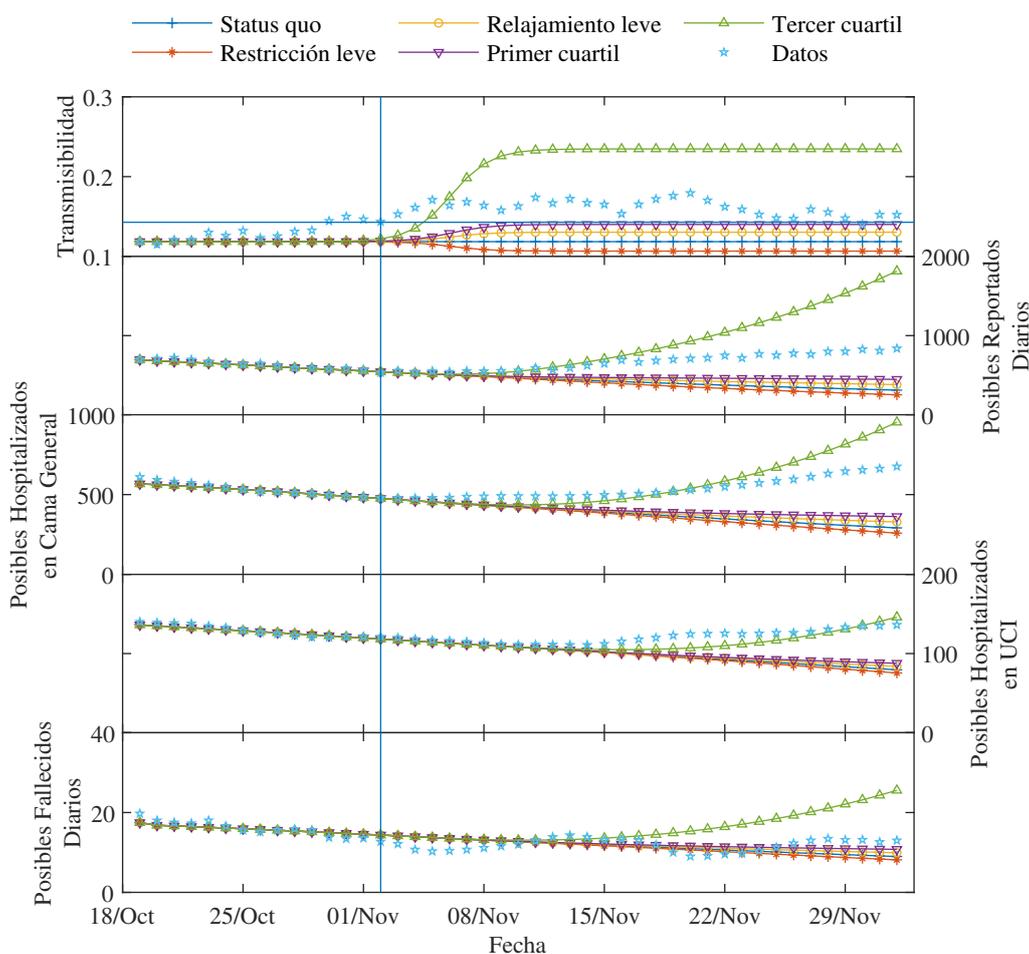


Figura 4: Proyección de escenarios desde el 2 de noviembre de 2020.

Cuadro 3: Desviación del error relativo de la proyección desde el 2 de noviembre de 2020.

	Status quo	Restricción leve	Relajamiento leve	Primer cuartil	Tercer cuartil
Transmisibilidad	0,310	0,418	0,226	0,173	0,252
Reportado diario	0,729	0,953	0,546	0,421	0,231
Hospitalizados	0,514	0,607	0,429	0,364	0,108
UCI	0,282	0,309	0,255	0,234	0,069
Fallecido diario	0,187	0,227	0,156	0,137	0,250

los datos hasta la fecha  $t_{j+W} = 14$  de febrero de 2021. Esto es, los parámetros estimados corresponden al de la fecha  $t_j = 31$  de enero del 2021, utilizando datos del  $t_{j+1} = 1$  de febrero al  $t_{j+W} = 14$  de febrero. Aquí, el primer y el tercer cuartil corresponden a los extremos de los escenarios. Se observa que la transmisibilidad se sitúa alrededor del escenario de relajamiento leve, alcanzando a valores elevados del tercer cuartil. Los posibles reportados siguen el escenario del tercer cuartil, mostrando que está en tendencia de crecimiento epidemiológico. En los posibles hospitalizados, los datos observados se sitúan por encima de todos escenarios. Esto se debe al continuo aumento de las proporciones de los infecciosos a hospitalizados desde el inicio de febrero

de 2021 observados en la Figura 3. Los posibles internados en UCI y fallecidos diarios están por encima del escenario del tercer cuartil.

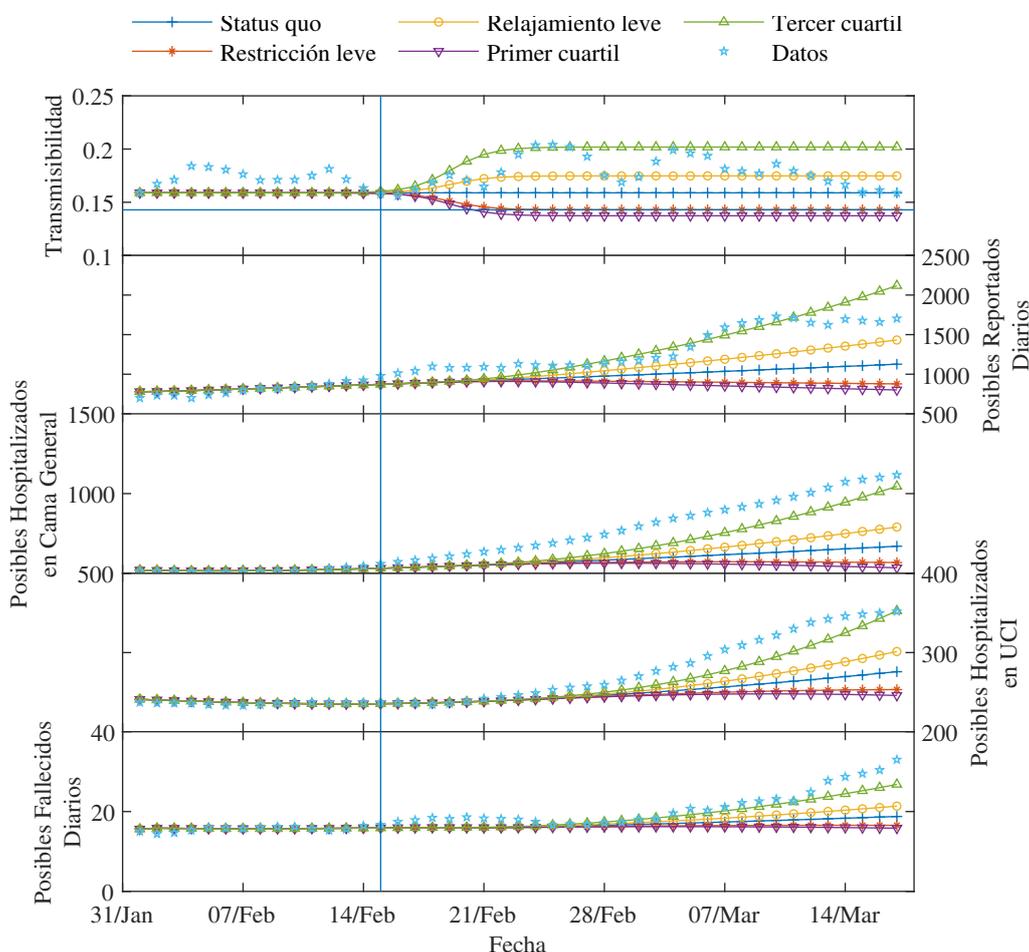


Figura 5: Proyección de escenarios desde el 15 de febrero de 2021.

El Cuadro 4 muestra la desviación del error relativo de las proyecciones mostradas en la Figura 5. Cuantitativamente, el escenario del tercer cuartil presenta menor error a los datos observados.

Cuadro 4: Desviación del error relativo de la proyección desde el 15 de febrero de 2021.

	Status quo	Restricción leve	Relajamiento leve	Primer cuartil	Tercer cuartil
Transmisibilidad	0,127	0,215	0,071	0,253	0,099
Reportado diario	0,311	0,483	0,182	0,556	0,104
Hospitalizados	0,334	0,437	0,246	0,477	0,133
UCI	0,135	0,171	0,100	0,185	0,049
Fallecido diario	0,248	0,321	0,182	0,348	0,091

## 6. Conclusión

En este reporte técnico se presentan resultados parciales del proyecto CONACYT PINV20-40 de simulación de modelos epidemiológicos para predicción y contingencia del COVID-19. El proyecto tiene como objetivo simular modelos epidemiológicos que permitan prever los efectos del COVID-19 en función a posibles acciones en Paraguay.

El modelo epidemiológico desarrollado en el contexto del proyecto CONACYT PINV20-40 es un modelo que se ajusta a las necesidades de Paraguay. Esto es, el modelo propuesto contiene la parte esencial de modelar la propagación de la epidemia como también consigue estimar las posibles cantidades de hospitalizados separados en internaciones generales e internaciones en unidades de cuidados intensivos. Así, con el presente modelo es posible pronosticar el curso de la epidemia y la cantidad de recursos necesarios para tratar a los enfermos. Como en cualquier modelo, en caso de que hayan variabilidades tanto del comportamiento social como también de la enfermedad misma, los pronósticos que arrojan las simulaciones del presente modelo tendrán validez en una ventana reducida de tiempo.

Los resultados de las simulaciones y los pronósticos serán mostrados en una aplicación web, y se realizarán pruebas de usabilidad. Así, la aplicación web que se desarrolla en el marco del presente proyecto será apto para ser utilizado por los tomadores de decisión.

## Agradecimiento

Los autores agradecen al apoyo financiero del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT, Paraguay) con apoyo del FEEI según el proyecto PINV20-40, y a la Dirección General de Vigilancia de la Salud (DGVS), dependiente del MSPyBS, por proveer los datos necesarios para el desarrollo de este proyecto.

## Declaración

La presente publicación ha sido elaborada con el apoyo del CONACYT. El contenido de la misma es responsabilidad exclusiva de los autores y en ningún caso se debe considerar que refleja la opinión del CONACYT.

Además, todos los autores declaran la no existencia de ningún conflicto de intereses, y que los datos proveídos por DGVS fueron tratados teniendo el cuidado necesario para mantener la confidencialidad de los mismos.

## Referencias

Delamater, P. L., Street, E. J., Leslie, T. F., Yang, Y. T. and Jacobsen, K. H. (2019). Complexity of the basic reproduction number ( $R_0$ ). *Emerging Infectious Diseases* 25: 1–4, doi:[10.3201/eid2501.171901](https://doi.org/10.3201/eid2501.171901).

Hethcote, H. W. (2000). Mathematics of infectious diseases. *SIAM Review* 42: 599–653, doi:[10.1137/S0036144500371907](https://doi.org/10.1137/S0036144500371907).

Smith, R. J., Li, J. and Blakeley, D. (2011). The failure of  $R_0$ . In Chu, H. (ed.), *Computational and Mathematical Methods in Medicine*. Hindawi Limited, 2011, 527610, doi:[10.1155/2011/527610](https://doi.org/10.1155/2011/527610).

## A. Actividades del proyecto

En esta sección del anexo se presentan las actividades que estuvieron previstas en el segundo trimestre del proyecto, con los medios de verificación que estarán en referencia al reporte presentado. Las actividades que son verificables por medio del presente reporte corresponden al ítem 6 y sus sub-ítem.

### Ítem 6: Simulación numérica de los modelos epidemiológicos en función a políticas de salud posibles.

Indicadores: Dos Simulaciones de Modelos epidemiológicos del COVID-19.

Estado: Completo

En el presente reporte se presentan las simulaciones de los escenarios identificados usando el modelo epidemiológico propuesto.

#### 6.1- Identificación de políticas de contención epidemiológica

Indicadores: Dos Políticas identificadas.

Estado: Completo

La Sección 4.1 presenta varios escenarios que podrían ser aplicadas como políticas de contención.

#### 6.2- Simulación del modelo epidemiológico bajo las políticas identificadas.

Indicadores: 1 simulación de Modelos epidemiológicos por cada política (2 en total).

Estado: Completo

La Sección 5.1 presenta los resultados de las simulaciones de los escenarios identificados.

#### 6.3- Análisis cualitativo de las simulaciones.

Indicadores: Un análisis cualitativo por cada simulación (2 en total).

Estado: Completo

Las Figuras 4 y 5 de la Sección 5.1 con las discusiones presentan el análisis cualitativo de las simulaciones.

## 6.4- Análisis cuantitativo de las simulaciones.

Indicadores: Un análisis cuantitativo por cada simulación (2 en total).

Estado: Completo

Los Cuadros 3 y 4 de la Sección 5.1 con las discusiones presentan el análisis cuantitativo de las simulaciones.

## Ítem 7: Desarrollo de plataforma web para presentación de resultados del COVID-19

Indicadores: Dos versiones de página web.

Medios de Verificación: Página web accesible al público.

Estado: Completo

### 7.1- Primera versión de la página web con proyecciones automáticas de COVID-19

Indicadores: 1 página web con el pronóstico de la cantidad de infectados por COVID-19 en Paraguay. Medios de Verificación: Página web accesible al público: <http://epymodel.uaa.edu.py/>

Estado: Completo

### 7.2- Segunda versión de la página web con proyecciones automáticas de COVID-19

Indicadores: actualización de la plataforma web con el pronóstico de la cantidad de infectados por COVID-19 en Paraguay. Medios de Verificación: Página web actualizada y accesible al público: <http://epymodel.uaa.edu.py/>

Estado: 90 %