

Modelando la pandemia en Chile y España
Ivan Derpich –Juan Valencia- Erick Miranda- Felioe Berríos
Centro CIGOMM –USACH
Departamento de Ingeniería Industrial
Universidad de Santiago de Chile

Abstract

Mientras en Chile se discute si la estrategia elegida por el gobierno consistente en cuarentenas selectivas locales y dinámicas, apoyadas en un alto número de testeos diarios es la correcta, un grupo de académicos asociados al centro el Centro de Ingeniería a partir de un modelo de propagación de las infectados y fallecidos opina que la estrategia usada por el gobierno es peligrosa, debido a la alta tasa de contagio que muestra la situación real y la predicción del modelo, como lo muestra los resultados de este trabajo. Ante esto se plantea la cuarentena total como una forma de control que aplacaría el crecimiento cuasi-exponencial de los contagios. Este trabajo tiene un espíritu académico de discusión interna de las cifras, las tendencias en los datos y las políticas de control actuales y propuestas. Es un trabajo preliminar que está siendo revisado y expandido a otros países de la región.

1.- Introducción : Un grupo de académicos asociados al centro han estado desarrollando un modelo matemático del covid-19, basado en lógica de estados discretos, del proceso de evolución desde el contagio hasta la recuperación o la muerte. En este tipo de modelación el individuo va pasando por diferentes estados desde estar sano, con el virus latente y luego infectado. Esta primera parte de la evolución se muestra en el siguiente diagrama. (figura 1)

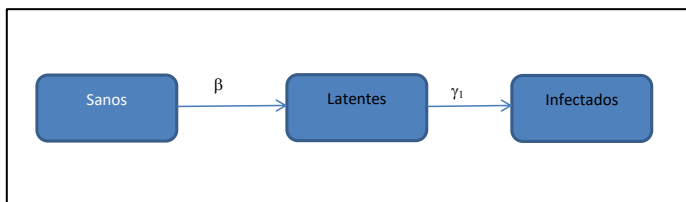
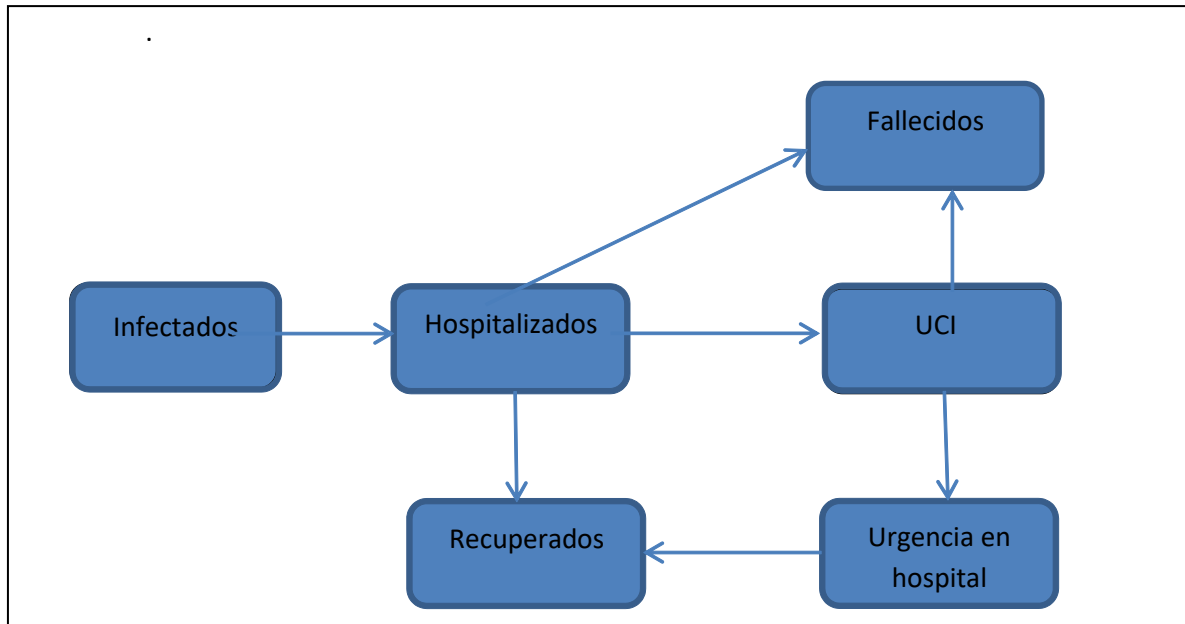


Figura 1 Evolución de los individuos

Todo individuo que se contacta con el virus pasa en periodo de latencia en el cual no contagia al contactarse con otra persona ni transmite el virus, después de un tiempo variable algunos individuos pasan a estar infectado, ser contagioso y desarrollar síntomas. Después de esta primera fase los infectados pueden evolucionar pasar a hospitalizados si tienen síntomas severos o eventualmente podrían fallecer. Para la mayoría de los infectados nada de esto ocurre y se recuperan. Esta segunda parte se muestra en el siguiente diagrama.

Figura 2 Evolucion intrahospitalaria



La figura 2 muestra el proceso que hemos llamado intrahospitalario debido a que ocurre dentro del hospital, cuando el individuo se agrava y pasa a la unidad de Cuidados Intensivos o directamente fallece, aunque la mayoría de los individuos se recuperan y sale del sistema. En este modelo se ha considerado que después de la UCI los individuos pasan a una unidad de Urgencia intrahospitalaria y luego salen recuperados. Las medidas asociadas a la cuarentena se representa como una zon de aislamiento que retira individuos sanos por algún tiempo, de modo que el universo o población expuesto disminuye, esto no necesariamente influye la tasa de contagio. Para que esto ocurra, es decir que baje la tasa de contagio se requieren otras medidas que produzcan toma de conciencia de parte de la población. El efecto de la cuarentena se muestra en la figura 3.

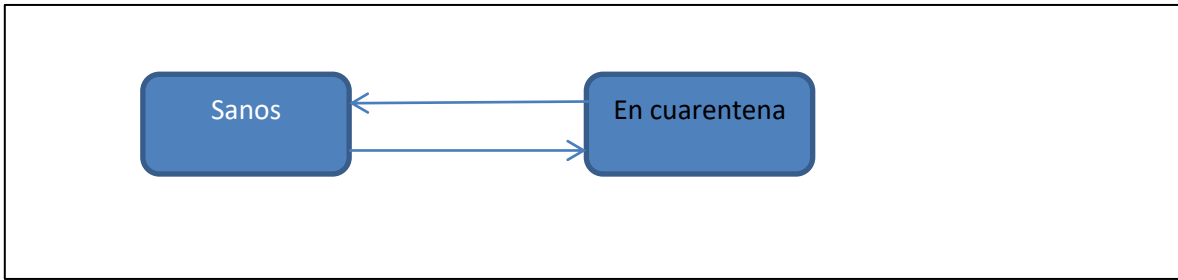
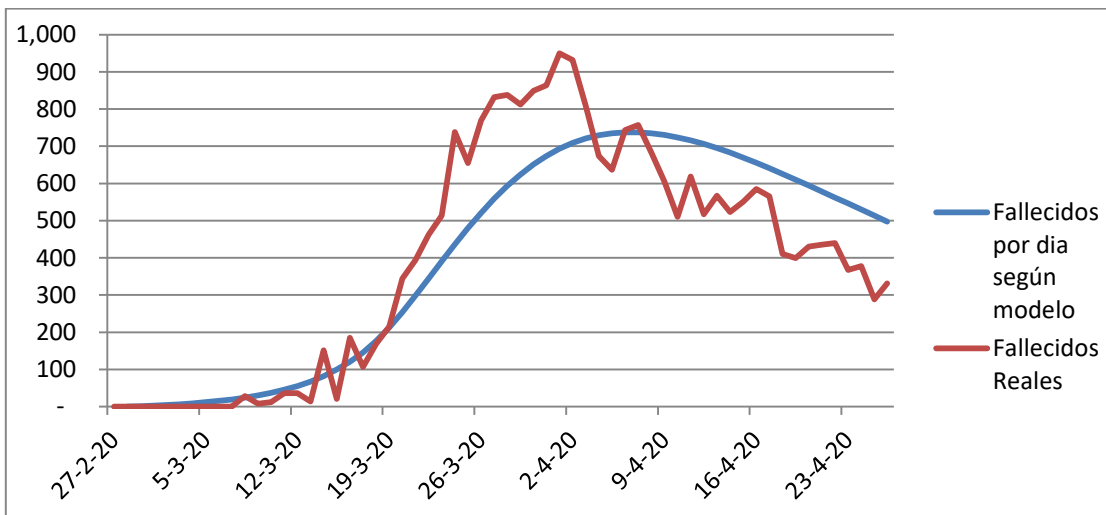


Figura 3 Cuarentenados y Sanos

Este modelo se ha aplicado a modelar la situación de contagiados y muertos en España, Chile y Brasil. A continuación se presentan los resultados simulados en estos países.

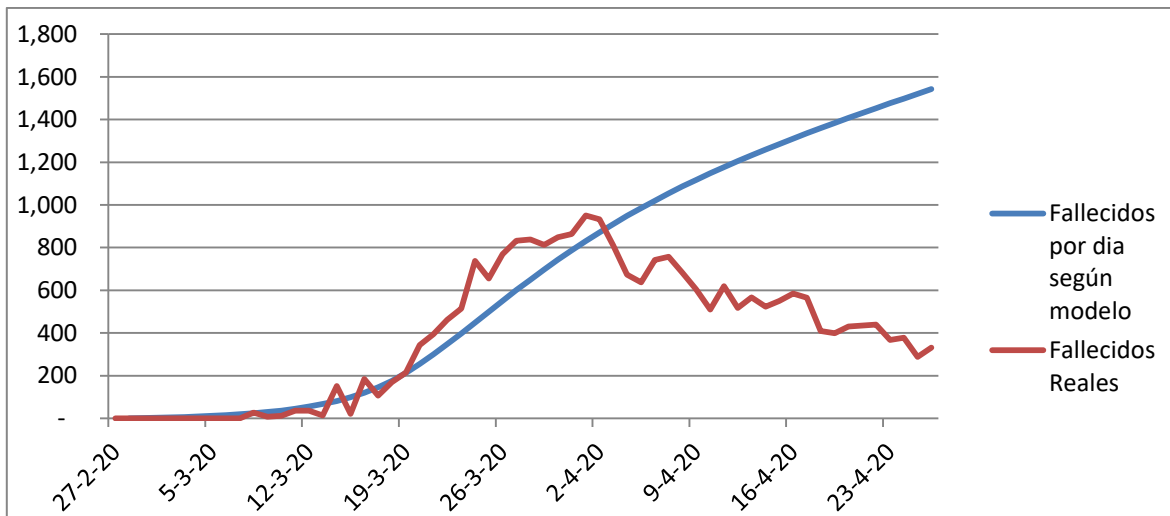
2.- Simulación de los casos de fallecidos en España y Chile.

El primer país estudiado es España, uno de los más golpeados con la pandemia de covid-19. En la gráfica 1 se muestra la estimación de fallecidos reales versus estimados por el modelo en España, desde el 27 de Febrero al 26 de Abril de 2020.



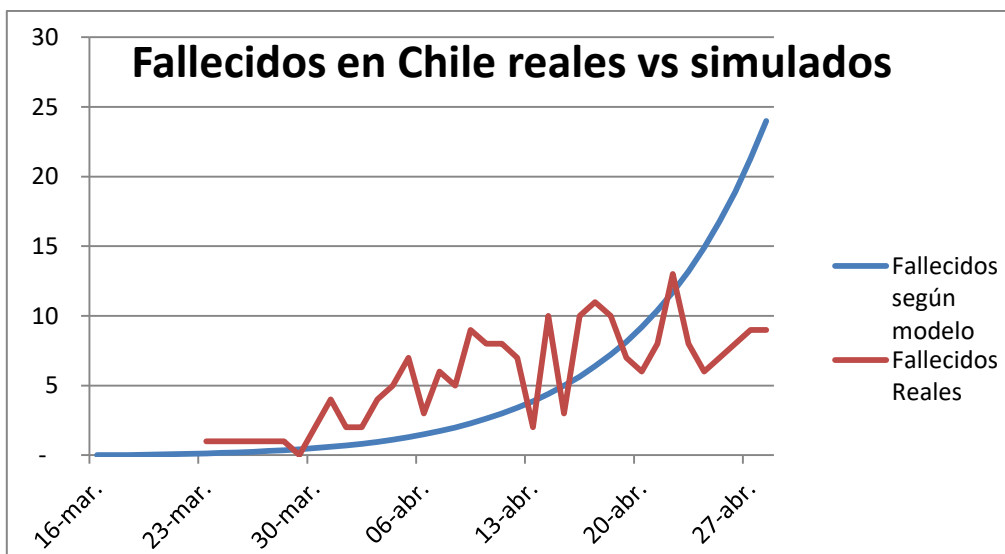
Gráfica 1 Fallecidos por día en España

Esta grafica muestra que la serie de datos que entrega el modelo se adapta a la serie de datos real, esta simulación incluye la cuarentena del 70% de la población que se aplicó el 16 de marzo en adelante y también al cambio de tasa de infección. Este cambio de tasa se debió al estado de alarma que decretó el gobierno y del cual se hicieron eco los medios. Este modelo para los datos de España arrojó una diferencia entre la estimación y los datos reales de 98 personas. La gráfica 2 muestra los fallecidos reales versus los que hubieran resultado sin cuarentena, pero manteniendo la tasa de alarma nacional.



Gráfica 2 Fallecidos por día en España si no se hubiera aplicad cuarentena

A continuación se simuló el comportamiento del virus en Chile. En la gráfica 3 se muestran los datos de la serie de valores correspondientes a fallecidos reales y pronosticados por el modelo.



La tendencia de los datos de fallecidos en Chile se escapa en el ultimo periodo de los datos reales, lo cual muestra que según la lógica del modelo la epidemia se encuentra en fase de crecimiento sostenido. La tendencia que muestra el modelo se condice en número de casos totales con los datos reales, y un poco por encima de la tendencia de los últimos días.

3.- El modelo desarrollado

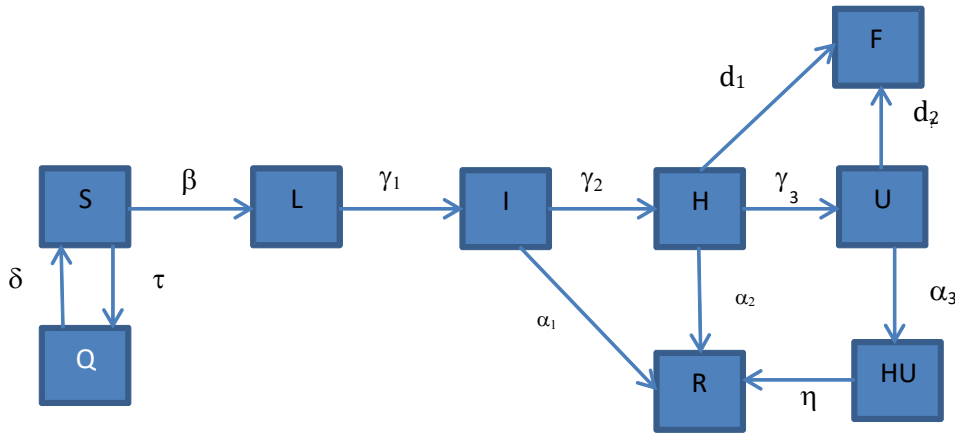
Está basado en el modelo SIR pero se han agregado más ecuaciones y variables del problema.

$$S(t + 1) = S(t) - \beta S(t) \frac{I(t)}{Pt} - \delta S(t) + \tau Q(t) \quad (1)$$

En que $Q(t)$ es el número de individuos en cuarentena y está dado por

$$Q(t + 1) = Q(t) + \delta S(t) - \tau Q(t) \quad (2)$$

$\delta S(t)$ son los susceptibles que dejan de serlo y pasan a cuarentena y $\tau Q(t)$ son los que salen de cuarentena y pasan a ser susceptibles.



Los susceptibles (**S**) si entran en cuarentena se aíslan y en cambio si se exponen a tasa B pueden pasar a ser Latentes (**L**), esto es que pueden estar contagiados o no, cosa que se sabrá después de un período de tiempo. Los latentes pasan a ser Infectados (**I**) a tasa γ_1

Un individuo infectado pasa a Hospitalizado (**H**) a tasa γ_2 o a Recuperado (**R**) a tasa α_1 . Un hospitalizado tiene tres posibles caminos : puede pasar a Recuperado (**R**) a tasa α_2 , o a una cama de Urgencia UCI (**U**) a tasa γ_3 o puede pasar a Fallecido (**F**) a tasa d_1 . Un paciente en cama de Urgencia UCI (U) puede recuperarse y pasar a un cama de Recuperación de Urgencia en cama de Hospital (HU) a tasa α_3 o Fallecer a tasa d_2 . Finalmente un paciente en cama HU se recupera y pasa a recuperados con tasa η .

Este modelo se complementa con las siguientes ecuaciones de diferencias.

$$L(t+1) = L(t) + \beta S(t) \frac{I(t)}{Pt} - \gamma_1 L(t) \quad (3)$$

$\beta S(t) \frac{I(t)}{Pt}$ son los nevos contagiados que aun no se sabe si serán infecciosos y se les llama latentes. $\gamma_1 L(t)$ son los que dejan de ser latentes.

$$I(t + 1) = I(t) + \gamma_1 L(t) - (\gamma_2 + \alpha_1) I(t) \quad (4)$$

$\gamma_1 L(t)$ son los latentes que pasan a ser infectados y $(\gamma_2 + \alpha_1)I(t)$ son los infectados que dejan de serlo pasando a ser hospitalizados o se recuperan a tasas γ_2 y α_1 respectivamente.

$$H(t + 1) = H(t) + \gamma_2 I(t) - (d_1 + \alpha_2 + \gamma_3)H(t) \quad (5)$$

$\gamma_2 I(t)$ son los nuevos infectados que ingresan a hospitalizados y $(d_1 + \alpha_2 + \gamma_3)H(t)$ son los que dejan de estar hospitalizados por que fallecen a tasa d_1 o se recuperan a tasa α_2 o empeoran y pasan a ocupar una cama de Urgencia UCI a tasa γ_3 .

$$U(t + 1) = U(t) + \gamma_3 H(t) - (d_2 + \alpha_3)U(t) \quad (6)$$

Los hospitalizados pasan a UCI a tasa γ_3 y salen de UCI a Sala de Urgencia Hospital (HU) a tasa α_3 y fallecen a tasa d_2

$$HU(t + 1) = H(t) + \alpha_3 U(t) - \eta R(t) \quad (7)$$

Los individuos que están en Urgencia de hospital pasan a urgencia UCI con tasa α_3 o se recuperan con tasa η .

$$R(t + 1) = R(t) + \alpha_1 I(t) + \alpha_2 H(t) + \alpha_3 HU(t) \quad (8)$$

Los infectados pasan a recuperados a tasa α_1 , los hospitalizados pasan a recuperados a tasa α_2 , mientras que los que se encuentran en recuperación en la unidad HU pasan a recuperados a tasa α_3 .

$$F(t + 1) = F(t) + d_1 H(t) + d_2 U(t) \quad (9)$$

Finalmente la transición a fallecidos ocurre desde los hospitalizados a tasa d_1 , desde la urgencia a tasa d_2 .

Calibración de los modelos: la calibración de ambos modelos de España y Chile se realizó usando la mayoría de los parámetros de los modelos españoles [1]. Para el modelo chileno se calibraron las tasas de contagio y de muerte en base a los datos hasta el 19 de Abril.

Observación: Este paper está guiado por un espíritu académico de modo de permitir la discusión interna sobre el tema, se encuentra en desarrollo y se extenderá al análisis de la situación de Brasil y México.

Referencias

[1] Modelo para el estudio de la dinámica de transmisión del SARS-COV-2 y la enfermedad del COVID19. Descripción técnica. Autores Clara Burgos Simón, Juan-Carlos Cortés, Elena López Navarro, David Martínez-Rodríguez, Pablo Martínez-Rodríguez, Raúl S. Julián, Rafael-J. Villanueva Instituto Universitario de Matemática Multidisciplinar, Universitat Politècnica de Valencia, 46022 Valencia, España. 2 de abril de 2020.

[2] [Ministerio de Sanidad. Enfermedad por nuevo coronavirus, COVID-19](#) [online].

[3] [Canal oficial del Ministerio de Sanidad en Telegram](#) [online].

[4] [Instituto Nacional de Estadística \(INE\)](#) [online].

[5] F. Brauer, C. Castillo-Chavez, *Mathematical Models in Population Biology and Epidemiology*, Springer New York, 2012. doi:[10.1007/978-1-4614-1686-9](https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1686-9).

[6] J. D. Murray (Ed.), *Mathematical Biology*, Springer New York, 2004. doi:[10.1007/b98868](https://doi.org/10.1007/b98868).

URL <https://doi.org/10.1007/b98868>

[7] Q. Li, X. Guan, P. Wu, X. Wang, L. Zhou, Y. Tong, R. Ren, K. S. Leung, E. H. Lau, J. Y. Wong, X. Xing, N. Xiang, Y. Wu, C. Li, Q. Chen, D. Li, T. Liu, J. Zhao, M. Liu, W. Tu, C. Chen, L. Jin, R. Yang, Q. Wang, S. Zhou, R. Wang, H. Liu, Y. Luo, Y. Liu, G. Shao, H. Li, Z. Tao, Y. Yang, Z. Deng, B. Liu, Z. Ma, Y. Zhang, G. Shi, T. T. Lam, J. T. Wu, G. F. Gao, B. J. Cowling, B. Yang, G. M. Leung, Z. Feng, *Early transmission dynamics in wuhan, china, of novel coronavirus (infected pneumonia)*, *New England Journal of Medicine* doi:[10.1056/nejmoa2001316](https://doi.org/10.1056/nejmoa2001316).

URL <https://doi.org/10.1056/nejmoa2001316>

[8] F. Zhou, T. Yu, R. Du, G. Fan, Y. Liu, Z. Liu, J. Xiang, Y. Wang, B. Song, X. Gu, L. Guan, Y. Wei, H. Li, X. Wu, J. Xu, S. Tu, Y. Zhang, H. Chen, B. Cao, *Clinical course and risk factors for mortality of adult inpatients with COVID-19 in wuhan, china: a retrospective cohort study*, *The Lancet* doi: [10.1016/s0140-6736\(20\)30566-3](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(20)30566-3).

URL [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(20\)30566-3](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(20)30566-3)

[9] Ministerio de Sanidad. Informe técnico: SARS-CoV y COVID-19 17.03.2020 [online] (2020).

[10] C. Burgos-Simón, Juan-Carlos Cortés, José-Ignacio Hidalgo, D. Martínez-Rodríguez, Rafael-J Villanueva, *Novelty swarm, the implementation of novelty search in the particle swarm optimization algorithm* doi:[10.13140/RG.2.2.26660.01924](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26660.01924).

URL <http://rgdoi.net/10.13140/RG.2.2.26660.01924>

[11] Informe de situación COVID-19. N° 20 Departamento de Epidemiología. Ministerio de Salud de Chile del 27 de Marzo de 2020.

[12] Informe epidemiológico enfermedad por Sars CoV-2 Chile, Departamento de Epidemiología, Ministerio de Salud del 20 de Abril de 2020.

[13] Informe epidemiológico enfermedad por Sars CoV-2 Chile, Departamento de Epidemiología, Ministerio de Salud del 01 de Abril de 2020.