

Efecto del Plan Paso a Paso sobre el número reproductivo efectivo del COVID-19 en Chile

Leonardo Jofré¹, Inés Varas², Luis Gutiérrez¹, Iván Gutiérrez¹, Oscar Ortiz³, Jaime Cerda⁴, Jessica Pavani¹, Danilo Garrido¹, and Gabriel Arriagada³

¹*Facultad de Matemáticas, Departamento de Estadística, Pontificia Universidad Católica de Chile*

²*Núcleo Milenio Centro para el Descubrimiento de Estructuras en Datos Complejos (MiDaS)*

³*Instituto de Ciencias Agroalimentarias, Animales y Ambientales – ICA3, Universidad de O'Higgins*

⁴*Facultad de Medicina, Departamento de Salud Pública, Pontificia Universidad Católica de Chile*

Resumen

En el desarrollo de una pandemia es importante cuantificar la transmisibilidad de la enfermedad para detectar cambios de ésta a través del tiempo, así como también evaluar el efecto de las medidas sanitarias que se determinen para controlar la diseminación de la enfermedad. En este último contexto, en Chile se estableció el Plan Paso a Paso que restringe de manera gradual la movilidad de personas a nivel comunal. Se propone un modelo espacio-temporal para la dinámica de contagios semanales de COVID-19 en Chile a nivel comunal, el cual permite estimar el número reproductivo efectivo del COVID-19 y el efecto de las diferentes fases del Plan Paso a Paso sobre éste. Los resultados indican que la fase de cuarentena permite, en promedio, mantener el número reproductivo efectivo bajo 1.

1. Introducción

Comprender la dinámica de la enfermedad en el desarrollo de una pandemia y evaluar la efectividad de las medidas sanitarias adoptadas es fundamental para la generación de políticas públicas destinadas a controlar la propagación de la enfermedad. En el contexto de la pandemia COVID-19 se han propuesto distintas metodologías para estimar el número reproductivo efectivo (R_t), el cual permite cuantificar la transmisión de la enfermedad viral. Además, se han establecido diferentes medidas orientadas a controlar la diseminación de la enfermedad, incluyendo medidas no farmacológicas como lo es el Plan Paso a Paso. Este plan consiste en el establecimiento de 4 diferentes niveles de restricción de movilidad y aislamiento social para las personas a nivel comunal. Algunos estudios internacionales han evaluado el efecto de la cuarentena sobre los casos nuevos de COVID-19 (ver [Nussbaumer-Streit et al. \[2020\]](#) y [Arriagada et al. \[2021\]](#)), sin embargo no hay estudios que cuantifiquen el efecto del Plan Paso a Paso sobre la contención de la pandemia en Chile. En este estudio se propone una metodología, basada en un modelo espacio temporal para la dinámica de contagio, considerando la información del Plan Paso a Paso en el tiempo y con el cual se puede estimar la dinámica del número reproductivo efectivo del COVID-19 en Chile a nivel comunal.

2. Objetivo

El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto del Plan Paso a Paso sobre el número reproductivo efectivo en Chile a nivel comunal.

3. Metodología

El estudio consideró un diseño retrospectivo basado en la información del número de casos nuevos de COVID-19 en Chile según semana epidemiológica entre marzo de 2020 a julio de 2021 para las 345

comunas del país (se excluye el territorio Antártico). Además, se utiliza la información de la etapa del Plan Paso a Paso vigente en la semana epidemiológica para cada comuna. El Plan paso a Paso incluye la Fase 1: Cuarentena, Fase 2: Transición, Fase 3: Preparación, Fase 4: Apertura.

Cori et al. [2013] propone que el número reproductivo efectivo R_t se puede aproximar como la razón entre los casos nuevos actuales al tiempo t , I_t , y una combinación convexa de los contagiados pasados (posibles contagiados primarios), es decir:

$$R_t = \frac{I_t}{\sum_{s=1}^t \omega_s I_{t-s}}, \quad (1)$$

donde los pesos $\omega_1, \dots, \omega_t$ definen el perfil infeccioso de la enfermedad, el cual sólo depende de características propias de la enfermedad. Así, si \mathcal{F}_{t-1} representa la información de los contagios nuevos hasta el tiempo $t-1$, entonces $E(I_t | \mathcal{F}_{t-1}) = R_t \sum_{s=1}^t I_{t-s} \omega_s$.

Dada la naturaleza espacial de la dinámica de la enfermedad, es importante considerar en el modelamiento la correlación espacial de los casos nuevos de COVID-19. Besag et al. [1991] proponen un modelo con efecto ICAR (Intrinsic Conditional Auto-Regressive model), el cual permite incorporar dependencia de las observaciones en unidades geográficas vecinas, y un efecto aleatorio para cuantificar la variabilidad no espacial. Esta propuesta ha sido ampliamente usado en modelos epidemiológicos (ver Lawson [2018]).

Basados en el resultado (1), se propone un modelo jerárquico que considera la estructura espacio-temporal del número de casos nuevos de COVID-19 en las comunas de Chile. Para las 345 comunas del país y por cada semana epidemiológica, denotemos por I_{ij} el número de casos nuevos para la comuna i en la semana j y $\mathcal{F}_{i,j-1}$ la información de los casos nuevos de la comuna i hasta la semana epidemiológica $j-1$. En base a la propuesta de Cori et al. [2013], se propone un modelo Poisson jerárquico para el número de casos nuevos de COVID-19, indexando el R efectivo por efectos fijos y aleatorios considerando la estructura geoespacial propuesta por Besag et al. [1991]. La estimación del modelo se realiza desde un enfoque Bayesiano considerando la siguiente estructura:

$$\begin{aligned} I_{ij} | \beta, \phi, u, \mathbf{w}, \mathcal{F}_{i,j-1} &\stackrel{iid}{\sim} \mathcal{Pois}(\mu_{ij}), \\ \mu_{ij} &= R_{ij} \sum_{s=1}^k \omega_s I_{t-s}, \\ R_{ij} &= \exp(\mathbf{x}'_{ij} \beta + \phi_i + u_i), \\ \beta &\sim \mathcal{N}_q(\mathbf{0}, \sigma_\beta^2 I_q), \\ \phi &\sim \mathcal{N}_m(\mathbf{0}, [\mathbf{D} - \mathbf{W}]^{-1}), \\ \mathbf{u} &\sim \mathcal{N}_m(\mathbf{0}, \tau^2 I_m), \\ \mathbf{w} &\sim \text{Dirichlet}(a_1, \dots, a_k), \end{aligned} \quad (2)$$

donde \mathbf{x}'_{ij} es el vector de efectos fijos (considerando la información de la fase del Plan Paso a Paso), β es el vector de parámetros de los efectos fijos, ϕ_i es la componente ICAR, u_i es el intercepto aleatorio para la comuna i y \mathbf{w} representa el perfil infeccioso de la enfermedad COVID-19. La implementación del modelo se realiza en Stan (Stan Development Team [2020]) valiéndose de la implementación del modelo Besag et al. [1991] en este software (Morris et al. [2019]).

Para este estudio, las fuentes de información utilizadas son los registros de casos nuevos (archivo p15_nuevos_cs) y la información del Plan Paso a Paso registrada en los archivos p29_cuarentena (cuarentenas comunales) y p74_pap_dc (Plan Paso a Paso comunal). Para mas detalles de la construcción de las fuentes de datos, ver Ortiz et al. [2021].

4. Resultados

Considerando la información de los casos nuevos de COVID-19 en Chile y la información del Plan Paso a Paso a nivel comunal a partir de la semana epidemiológica 10 del año 2020, se observa que la Fase 1 de Cuarentena es la fase que más tiende a disminuir el valor del R efectivo (ver Tabla 1). Para cada una de las fases, se estima el R efectivo promedio asociado a cada paso, lo cual se resume en la Tabla 2. Se observa para las fases 3 y 4 (Preparación y Apertura Inicial, respectivamente), el intervalo

Tabla 1: Estimaciones de los parámetros de las distintas fases del Plan Paso a Paso considerando información desde marzo de 2020 a julio de 2021

Nombre Parámetro	Media	Intervalo 95 % Credibilidad
Fase 1: Cuarentena	-0.3056	(-0.3076 ; -0.3035)
Fase 2: Transición	-0.1947	(-0.1976 ; -0.1916)
Fase 3: Preparación	-0.0761	(-0.081 ; -0.0713)
Fase 4: Apertura Inicial	0.1489	(0.1475 ; 0.1505)

Tabla 2: Estimaciones del R efectivo promedio de las distintas fases del Plan Paso a Paso considerando información desde marzo de 2020 a julio de 2021.

R efectivo	Media	Intervalo 95 % Credibilidad
Fase 1: Cuarentena	0.8550	(0.8529; 0.8573)
Fase 2: Transición	0.9554	(0.9523 ; 0.9586)
Fase 3: Preparación	1.0754	(1.0702 ; 1.0812)
Fase 4: Apertura Inicial	1.1606	(1.1589 ; 1.1624)

de 95 % de credibilidad está por sobre el valor 1, mientras que para las fases 1 y 2 (Cuarentena y Transición) este intervalo está bajo el valor 1.

Para ilustrar los resultados obtenidos en este estudio, en la Figura 1 se muestra la evolución de los casos nuevos para la comuna de Calama en todo el período de estudio. En la figura se muestra además la predicción de los casos nuevos por el modelo y el valor del R efectivo. En colores, se muestra el R efectivo asociado a la fase del Plan Paso a Paso durante el período de estudio, con un rezago de dos semanas. Se observa que al final de cada período en fases de mayor relajo en la movilidad de las personas (Fase 3 y 4), los casos tienden a aumentar, mientras que en fases de mayor restricción, la dinámica de contagios tiende a disminuir.

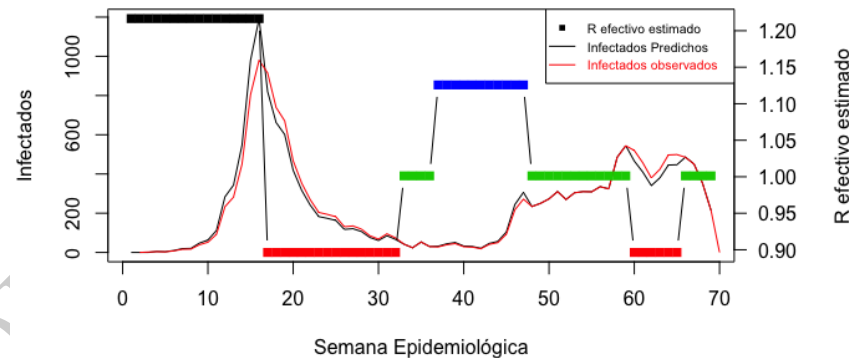


Figura 1: Dinámica de contagio y estimación del R efectivo para la comuna de Calama, Región de Antofagasta, entre marzo de 2020 a julio de 2021. La fase del Plan Paso a Paso se muestra en colores: Fase 1 de Cuarentena (rojo), Fase 2 de Transición (verde), Fases 3 de Preparación (azul) y Fase 4 de Apertura Inicial (negro).

Dado que el modelo propuesto permite estimar el valor del R efectivo a nivel comunal, en la figura 2 se muestra el valor del R efectivo para las comunas de la región de Antofagasta en cada una de las fases del Plan Paso a Paso. Se observa que, a medida que se avanza a medidas menos restrictivas en el Plan, el valor del R efectivo para la mayoría de las comunas en la región tienden a estar por sobre el umbral de 1.

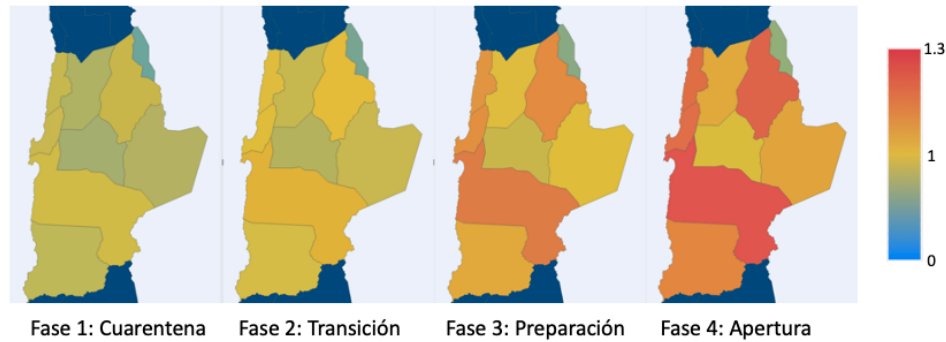


Figura 2: Estimación del R efectivo a nivel comunal para las comunas de la región de Antofagasta.

5. Conclusiones preliminares

Los resultados de este estudio indican que existe un efecto del Plan Paso a Paso sobre el R efectivo: la fase de cuarentena y la fase de transición permiten contener el valor del R efectivo promedio bajo el valor 1. A medida que se avanza en el Plan Paso a Paso (desde fase 3 en adelante), este valor sobrepasa el umbral de 1, en promedio. Además, con la metodología propuesta se puede cuantificar la efectividad del Plan Paso a Paso de forma diferenciada para cada comuna indicando cuáles responden de mejor o peor manera a las medidas restrictivas.

Referencias

- G. Arriagada, L. Jofré, I. M. Varas, D. Garrido, O. Ortiz, I. Gutiérrez, J. Pavani, J. Cerda, and L. Gutiérrez. Evaluación del efecto de las cuarentenas sobre la dinámica espacio-temporal de covid-19 en Chile. <https://epicovid.cl/>, 2021. URL <https://epicovid.cl/>.
- Julian Besag, Jeremy York, and Annie Mollié. Bayesian image restoration, with two applications in spatial statistics. *Annals of the Institute of Statistical Mathematics*, 43(1):1–20, 1991.
- Anne Cori, Neil Ferguson, Christophe Fraser, and Simon Cauchemez. A new framework and software to estimate time-varying reproduction numbers during epidemics. *American Journal of Epidemiology*, 178, 09 2013.
- Andrew B Lawson. *Bayesian disease mapping: hierarchical modeling in spatial epidemiology*. Chapman and Hall/CRC, 2018.
- M. Morris, Katherine Wheeler-Martin, Daniel P. Simpson, S. Mooney, A. Gelman, and C. DiMaggio. Bayesian hierarchical spatial models: Implementing the Besag York Mollié model in stan. *Spatial and Spatio-temporal Epidemiology*, 31:100301, 2019.
- B. Nussbaumer-Streit, V. Mayr, Dobrescu A. I., E. Chapman A., Persad, I. Klerings, G. Wagner, U. Siebert, C. Christof, C. Zachariah, and G. Gartlehner. Quarantine alone or in combination with other public health measures to control covid-19: a rapid review. *The Cochrane database of systematic reviews*, 4, 2020.
- Oscar Ortiz, Danilo Garrido, Gabriel Arriagada, Luis Gutiérrez, Jaime Cerda, Jessica Pavani, Leonardo Jofré, Inés Varas, and Iván Gutiérrez. Base de datos epidemiológica y sociodemográfica COVID-19 en Chile y el mundo. <https://epicovid.cl/>, 2021. URL <https://epicovid.cl/>.
- Stan Development Team. RStan: the R interface to Stan, 2020. URL <http://mc-stan.org/>. R package version 2.21.2.