



Universidad del Desarrollo
Facultad de Ingeniería

**EFFECTOS DE LA MOVILIDAD INTERREGIONAL EN LA PROPAGACIÓN DE
CASOS DE COVID-19 EN CHILE**

POR: CÉSAR MARÍN Y JESÚS BERRÍOS

Proyecto de grado presentado a la Facultad de Ingeniería de la Universidad
del Desarrollo para optar al grado académico de Magíster en Data Science

PROFESOR GUÍA:
Dr. Leo Ferres

Enero 2022
SANTIAGO DE CHILE

DEDICATORIA

César Marín:

*A mi familia por todo su apoyo e inspiración
en cualquier momento*

Jesús Berríos:

*A mis padres, Lorena y Jesús, cuyo amor
incondicional es más que una inspiración para mí.
A mi complemento en esta vida, Ana Harrington.
A mi madrina Dilia, pilar fundamental de lo que soy.*

AGRADECIMIENTO

César Marín:

A Dios en primer lugar por permitirme estar acá

A mi familia y amigos por todo su apoyo incondicional para enfrentarme a nuevos retos.

A mi tutor Leo y compañero Jesús por su dedicación y conocimiento puestos en esta investigación.

Jesús Berríos:

En primer lugar agradezco a Dios por permitirme tener mis cinco sentidos activos para poder iniciar y terminar este trabajo.

A mi futura esposa Ana Harrington, por su comprensión y apoyo durante todo el proceso del Magíster en Data Science.

A mi compañero César Marín, por su gran motivación para siempre ir más allá del aprendizaje que se espera, en constante búsqueda de la excelencia.

A nuestro tutor Leo Ferres, por la confianza depositada para enfrentar este desafío y la oportunidad de desarrollar un proyecto de impacto.

A mi madre, que siempre estuvo enviándome sus buenas energías.

TABLA DE CONTENIDO

Resumen.....	1
1. Introducción	2
2. Trabajo Relacionado	3
3. Hipótesis y Objetivos	7
4. Datos y Metodología.....	7
4.1 Datos	7
4.1.1. Datos de Telefonía Móvil.....	8
4.1.2 Datos de casos confirmados y muertes por COVID-19 en Chile.....	10
4.1.3 Datos de Censo 2017.....	12
4.2 Metodología	13
4.2.1 Cálculo de asertividad de casos por región.....	15
4.2.1.1 CFR base estratificado.....	15
4.2.1.2 CFR diario corregido.....	15
4.2.1.3 Asertividad de casos	16
4.2.2 Cálculo de incidencia, prevalencia, casos importados y calificación de riesgo de contagio	16
4.2.3 Estimación de Ritmo Reproductivo Básico R_t	17
5. Resultados	18
5.1 CFR Base por región.....	18
5.2 Estimación Asertividad de casos diaria por región.....	19

5.3 Asertividad de casos diaria por región.....	21
5.4 Escenarios de Movilidad Interregional	23
5.5 Ritmo Reproductivo Básico (Rt) calculado	24
5.6 Risk Rating por Región.....	26
5.7 Análisis de casos exportados por región.....	27
5.8 Análisis Risk Rating vs. Ritmo Reproductivo Básico (Rt).....	29
5.9 Sumarización de resultados.....	35
6. Conclusiones y Trabajo Futuro	36
Bibliografía	39

Resumen

La pandemia provocada por el virus SARS-CoV-2 ha llevado a que todos los países implementen medidas que reduzcan la movilidad internacional y doméstica para así evitar el crecimiento acelerado de casos de COVID-19. Debido a los altos costos sociales y económicos de estas restricciones las autoridades chilenas han impulsado una serie de medidas dinámicas, las cuales han estado enfocadas en zonas geográficas específicas como por ejemplo, regiones y comunas. El objetivo principal de esta investigación está referido precisamente a evaluar el efecto de estas restricciones de movilidad, en un contexto interregional. Los datos considerados durante el desarrollo de este trabajo provienen de fuentes públicas, como las cifras oficiales de coronavirus del Ministerio de Salud, y privadas, como datos de registros telefónicos de tipo eXtended Detail Records. Los resultados obtenidos reflejan la importancia de considerar la proporción de muertes por caso confirmado (CFR) de cada región debido a la demografía heterogénea de ellas. Además, las estimaciones de asertividad, que corresponden a la proporción de casos sintomáticos efectivamente reportados, muestran que en la mayoría de las regiones se tiene un comportamiento creciente conforme avanzan los primeros meses de la pandemia con excepción de la Región Metropolitana la cual no muestra una mejoría clara para esta métrica. Por otro lado, los datos de telefonía permitieron dimensionar los cambios de movilidad en escenarios de pre-pandemia, restricciones parciales y cuarentena total para luego poder estimar la cantidad de casos importados y finalmente estimar el índice de riesgo por cada región destino. Se encontró que, de acuerdo a esta métrica y al ritmo reproductivo básico R_t , las medidas de restricción en la movilidad interregional para los escenarios estudiados tuvieron un efecto sustancial en la mayoría de las regiones con datos disponibles.

1. Introducción

Desde marzo del 2020 la Organización Mundial de la Salud declaró al COVID-19, una enfermedad causada por el virus SARS-CoV-2, como una pandemia mundial [1]. Durante el desarrollo de ese año fueron implementadas diferentes intervenciones no farmacológicas (INFs) en el territorio chileno, esto con el fin de evitar una transmisión rápida y el colapso de servicios sanitarios [2]. Estas medidas involucraron no sólo acciones generalizadas como distanciamiento social y restricciones de viajes internacionales, sino que consideraron un nivel de granularidad geográfica más específico al tomar en cuenta restricciones regionales y, a su vez, en las comunas que la componen.

Durante el 2020 la comunidad científica ha realizado avances importantes en el desarrollo y distribución de diferentes vacunas contra en COVID-19. El 24 de diciembre del 2020 fue vacunada la primera persona en el país, la cual se convirtió también en la primera inoculación en Latinoamérica. A pesar de estos esfuerzos, la OMS declaró que resulta imposible lograr alguna inmunidad global durante el 2021 [3]. Frente a esto surge el desafío para las autoridades del país a mantener acciones que ayuden a controlar el número de contagios con un escenario económico y social ya fatigado, que ha sumergido a Chile en la mayor recesión económica desde el año 1982 [4].

Luego de haber presentado esta breve introducción en el contexto de la pandemia mundial, se puede evidenciar la importancia del desarrollo de esta investigación cuyo objetivo principal consistió en determinar el efecto de la movilidad interregional en Chile bajo diferentes escenarios epidemiológicos. Esto permitió sustentar, con base en datos, la toma de decisiones en cuanto a las restricciones de movilidad de personas entre las diferentes regiones del país.

La mayor complejidad durante el desarrollo de la presente investigación radicó en la diversidad de fuentes de datos que debieron ser exploradas para obtener las métricas e

indicadores necesarios que permitieron el cumplimiento de los objetivos planteados. En primer lugar, se estimaron los valores de prevalencia e incidencia para cada una de las regiones a partir de los datos de casos y muertes, los cuales fueron ajustados por un framework bayesiano que toma en cuenta la asertividad de casos reportados e infecciones asintomáticas. Seguidamente, se utilizaron datos de registros telefónicos de tipo eXtended Detail Records (XDRs) los cuales consideran cada interacción entre un dispositivo d y una antena a en un momento determinado tiempo t [18]. Estos fueron la fuente de información de las estimaciones de movilidad para los tres escenarios epidemiológicos de las regiones consideradas y que se basan en niveles de movilidad pre-pandemia, con restricciones parciales y de cuarentena total. Posteriormente, se estimaron los casos importados por los viajes interregionales a partir de la prevalencia y la incidencia local para los períodos de estudio. Finalmente, se comparó la influencia de los casos importados en relación al contexto de transmisión local del virus SARS-CoV-2.

La oportunidad de utilizar datos de registros telefónicos para el estudio de movilidad permitió abordar nuevas dimensiones, tales como patrones de movimiento, estimaciones de densidad poblacional y estatus socioeconómico [5] que no podrían ser exploradas en investigaciones similares [6]. Por todo esto, se esperaban obtener resultados que permitieran un análisis multidimensional clave para el desarrollo de acciones que se traduzcan en bienestar para las regiones de Chile.

2. Trabajo Relacionado

A pesar de que el virus SARS-CoV-2 fue por primera vez identificado con su secuencia genética el 12 de enero de 2020 [9] ya existen un gran número de investigaciones publicadas en diferentes áreas gracias a un gran esfuerzo de la comunidad científica en la producción, revisión y aprobación de estas.

En primera instancia, se revisaron algunos estudios enfocados en caracterizar la propagación del virus y así hallar la proporción de casos que no logran ser reportados oficialmente [10,13,14,16]. Luego, se fueron sumando a esta revisión diferentes trabajos e investigaciones que profundizan en los efectos y evaluación de las medidas de reducción de viajes internacionales y movilidad en general [5,6,17,19].

Son muchos los factores, que se han identificado, como fuentes de inexactitud en el proceso de diagnóstico de cualquier situación epidemiológica en tiempo real por parte de las autoridades sanitarias. Las características específicas de la pandemia por SARS-CoV-2 que han sido analizadas en diferentes investigaciones y que contribuyen a esta problemática tienen que ver con la poca certeza de la cantidad de casos que son asintomáticos [10], la duración del periodo de incubación que presenta una mediana de 5.1 días con una cola alargada que alcanza los 11.5 días para el percentil de 97.5% de pacientes sintomáticos [11] y la alta capacidad de transmisión durante esta etapa [12]. De manera que las intervenciones no farmacéuticas (INF) son tomadas y evaluadas bajo un escenario poco realista, al menos en cuanto al conteo de casos y demás indicadores que dependen de éstos.

Esta situación ha motivado el desarrollo de diferentes modelos con un enfoque bayesiano [13,14] que, tomando en consideración indicadores más confiables, como el conteo de muertes, logran obtener distribuciones posteriores que caracterizan la extensión de la pandemia en diferentes zonas geográficas. El modelo tomado como referencia en esta investigación [14] y adaptado para su aplicación a las regiones de Chile parte de la comparación diaria del Case Fatality Ratio (CFR) modificado según la distribución de retraso representada por el periodo de hospitalización a muerte, descrita en [16], con respecto a un valor CFR base. Siendo, de manera general, el CFR definido como la proporción de entre el número total de muertes debido a la enfermedad y el total de personas diagnosticadas [14]. Este proceso ha obtenido resultados consistentes al ser

comparados con los datos de seroprevalencia de diferentes países durante los primeros meses de la pandemia [14] y ha sido tomado como punto de partida de investigaciones posteriores [6].

Uno de los puntos principales que fueron tomados en consideración para el modelo presentado en este trabajo fue la adaptación demográfica del CFR base tanto para el caso general de Chile como el específico de cada una de las 16 regiones. Esto debido a que existe una clara variación de la severidad de los casos de coronavirus según los rangos de edades de los pacientes [15] mientras que existe además una distribución heterogénea de la población chilena [8]. Los resultados obtenidos por Verity et al. [15] hallaron una fuerte correlación entre el riesgo de muerte y la edad de los infectados tanto para una muestra tomada en las primeras etapas de la pandemia en China como para otra muestra de casos internacionales. El CFR en personas mayores de 80 años llega a una media de 18.4% lo que representa al menos 50 veces más de lo esperado para las personas con una edad <60 años (0.32%).

Con la finalidad de evitar la rápida transmisión del virus SARS-CoV-2 y el colapso de los servicios sanitarios, en Chile se ha tenido que recurrir a la implementación de intervenciones no farmacológicas (INFs), entre las que se encuentran el distanciamiento social, cordones sanitarios, cierres de escuelas y cuarentenas, las cuales han tenido efectos en los comportamientos de movilidad del país [2]. Asimismo, se han implementado restricciones de movilidad internacional, entre las que se puede destacar el primer cierre de fronteras el 18 de marzo de 2020 [22] y el inicio de la cuarentena total en Santiago efectiva desde el 16 de mayo.

En diversos estudios se ha demostrado que las restricciones de movilidad internacional son efectivas para disminuir la propagación de la pandemia [17,19], pero tienen un gran impacto en el desarrollo de la economía de los países [18], por lo que dada la duración que ha tenido la pandemia es necesario que las restricciones sean aplicadas

con el menor impacto posible, ya que la efectividad de las medidas restrictivas de movilidad internacional dependen del momento en que son aplicadas, así como de la duración e intensidad de las mismas, asimismo, están estrechamente relacionadas con la densidad poblacional y geografía [19]. Adicionalmente, se ha demostrado que las medidas de restricción de movilidad internacional han sido efectivas si están combinadas con otras medidas que logren la reducción de transmisión de casos locales en al menos un 50% [17].

Las restricciones de los viajes internacionales pueden contribuir en el control de la pandemia de algunos países, pero deben considerarse los valores de incidencia local y volúmenes de viaje antes de implementar dichas medidas, ya que los casos importados pueden representar una contribución poco significativa a la propagación de la epidemia localmente, demostrándose de esta manera que las restricciones de viajes internacionales han sido aplicadas de manera injustificada en algunos países [14].

En Chile se han utilizado datasets de telefonía móvil para analizar patrones de movilidad con diversos fines, entre los cuales se tienen inferencias de modos de transporte [20] y la generación de métricas tales como índices de movilidad, con las cuales se ha logrado estudiar el comportamiento de la implementación de INFs [5], evidenciando las reducciones de movilidad a nivel comunal, regional y nacional. De igual forma, se ha logrado integrar dichos datos para estudios de efectos de desigualdad social en la mitigación del COVID-19 [18], del que se puede destacar la caracterización de escenarios de movilidad: movilidad base o usual antes de la pandemia, movilidad ante la implementación de las primeras INFs y movilidad en cuarentena total. Dicha caracterización de escenarios de movilidad es clave en un país donde las restricciones han sido tomadas de manera dinámica y localizadas a nivel de regiones y comunas con cambios en el tiempo.

El desarrollo de este trabajo no sólo sienta sus bases en estas investigaciones previas sino que las toma como motivación para su aplicación en nuevas condiciones y

áreas geográficas en donde resulta novedoso y existe la capacidad de aportar nuevos conocimientos y resultados relevantes dentro de la emergencia sanitaria provocada por el virus SARS-Cov-2 en Chile, haciendo foco en el movimiento interregional, efectividad de restricciones y dinámica del virus.

3. Hipótesis y Objetivos

Hipótesis: La movilidad interregional influye de manera significativa en la propagación de la enfermedad COVID-19 a nivel regional.

Objetivo general: Determinar si la movilidad interregional en Chile influye en la propagación del virus COVID-19 a nivel regional en Chile.

Objetivos específicos:

- Identificar patrones de movilidad entre regiones a partir de datos anonimizados de telefonía celular del proveedor Movistar.
- Comparar la contribución de la movilidad interregional en el riesgo de contagio bajo diferentes escenarios epidemiológicos.
- Comprobar la eficacia de las restricciones de movilidad bajo un contexto interregional.

4. Datos y Metodología

4.1 Datos

A continuación, se procede a presentar los datos y metodología empleados para determinar el efecto de la movilidad interregional en Chile en la propagación del virus COVID-19.

4.1.1. Datos de Telefonía Móvil

Se utilizaron datos de Telefonía Móvil provistos por Telefónica/Movistar Chile la cual para los períodos de estudio posee entre el 29-32% del mercado de abonados móviles en Chile [5], se utilizaron de manera específica los eXtended Detail Records (XDR), los cuales contienen las transacciones de tráfico para todos los usuarios de la red de Movistar. Dichos XDR contienen un identificador de usuario (anonimizado), el timestamp que da el tiempo en el que se genera la transacción y la antena donde se genera. Dicha antena es el elemento que provee la conexión física, empleando como medio de transmisión la interfaz de aire, entre el dispositivo móvil de usuario y los elementos del núcleo de la red móvil encargados de proveer los servicios ofrecidos por los operadores móviles.

Dado esto, los operadores móviles tienen la capacidad de coleccionar la información de todas las antenas en la que los usuarios han generado transacciones, y teniendo en cuenta que la antena es un dispositivo fijo con ubicación geográfica determinada en el territorio nacional, se puede asociar directamente la comuna, provincia y región de los usuarios que se hayan conectado a dichas antenas.

Para efectos del presente estudio se requiere cuantificar la movilidad interregional de los usuarios, es decir, determinar la cantidad de usuarios que se han movilizado desde todas las posibles regiones origen a todas las posibles regiones destino. Por consiguiente, se procede obtener todas las transiciones entre antenas que impliquen un cambio de región para todos los usuarios. A continuación, se muestra un ejemplo de cómo se cuentan los viajes interregionales por usuario:

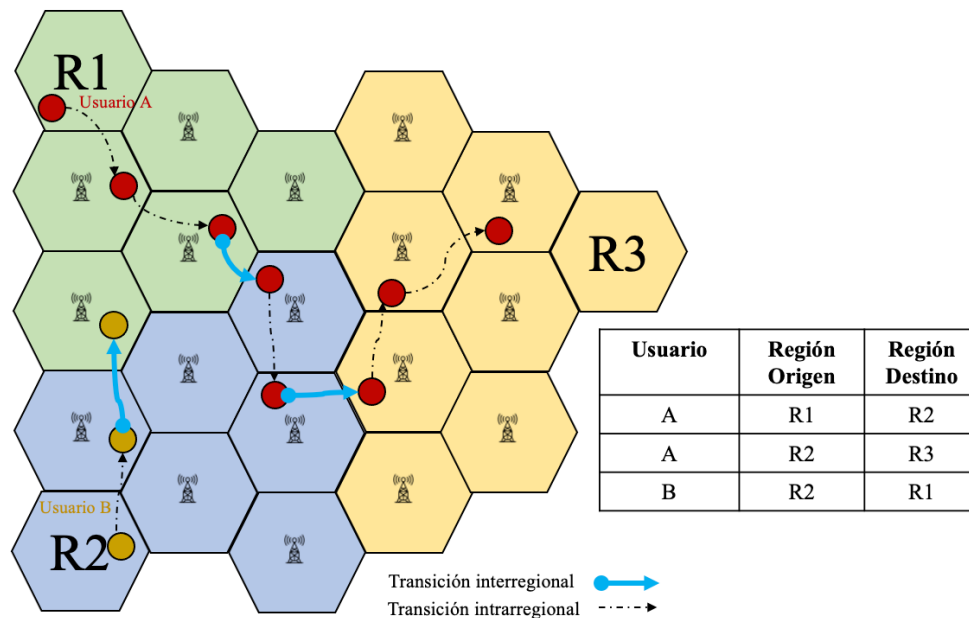


Gráfico 1: Ejemplo de conteo de viajes interregionales por usuario

En el gráfico 1 se puede apreciar un ejemplo de movilidad para dos usuarios, en el que ambos poseen transiciones entre celdas de la misma región, así como cambios de posición entre celdas desde una región origen a una región destino. Se observa que el usuario A ejecuta dos transiciones intrarregionales antes de cambiar de R1 a R2, mientras que al pasar a R2, se traslada a una zona de cobertura dada por otra antena de la misma región antes de pasar a R3, en donde finaliza su movilidad dentro de esta misma región. Con respecto al usuario B, se tiene que ejecuta una transición interna y su siguiente movimiento es un cambio de región de R2 a R1, en donde finaliza su trayectoria.

Dado que el presente estudio está enfocado sólo en la movilidad interregional, se procede a tomar en cuenta sólo las transiciones que impliquen un cambio de región para todos los usuarios en toda la extensión de la cobertura de telefonía móvil, y posteriormente, se suman dichas transiciones para todas las combinaciones de regiones origen-destino que se hayan registrado, resultando un dataset con el siguiente formato: Fecha (día), Región Origen, Región Destino, Cantidad de viajes.

4.1.2 Datos de casos confirmados y muertes por COVID-19 en Chile

En el desarrollo de la pandemia en Chile, el Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación actualiza periódicamente las métricas COVID-19 obtenidas a nivel nacional, entre las que se encuentran el *Data Product 13 - Casos nuevos totales por región, incremental* y *Data Product 14 - Fallecidos con COVID-19 por región incremental*¹ los cuales contienen toda la información de contagios y muertes en granularidad diaria por región. Se ejecutó el procesamiento de estos datos para finalmente obtener: Fecha (Día), Región, Casos nuevos, Casos acumulados al día, Muertes nuevas, Muertes acumuladas al día. A continuación, en el gráfico 2 se muestran la evolución en el tiempo de los casos y muertes acumuladas por región:

¹ Repositorio MinCiencia/Datos-COVID19. Github: <https://github.com/MinCiencia/Datos-COVID19.git>

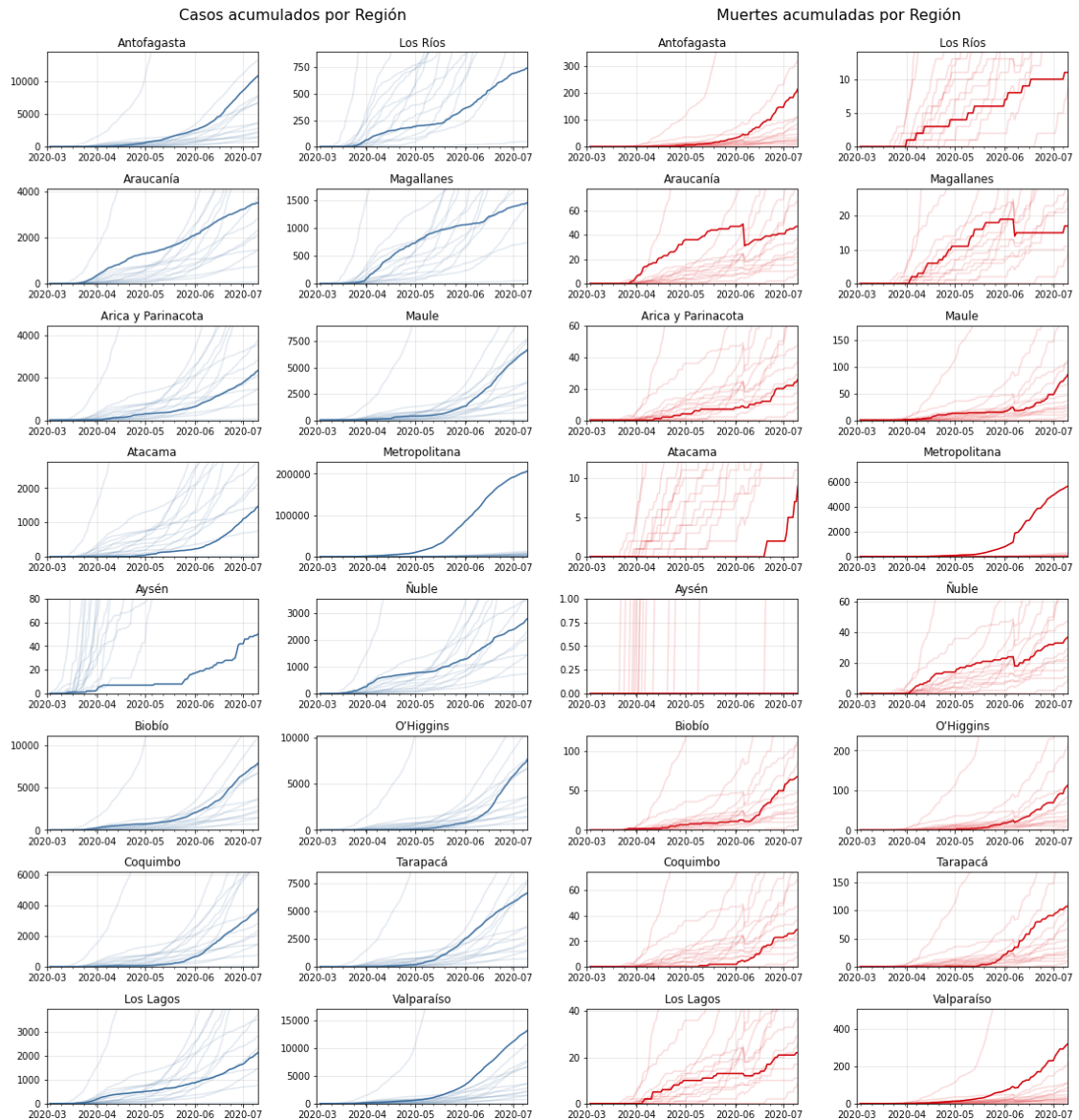


Gráfico 2: Casos y Muertes acumuladas por región

A partir de los datos procesados se procedió a calcular las métricas necesarias que permitieron ejecutar el análisis requerido para determinar los efectos de la movilidad sobre el desarrollo de la pandemia.

4.1.3 Datos de Censo 2017

Se utilizaron los datos de población regional en 2017 (último Censo) [7], los cuales se muestran en el gráfico 3.

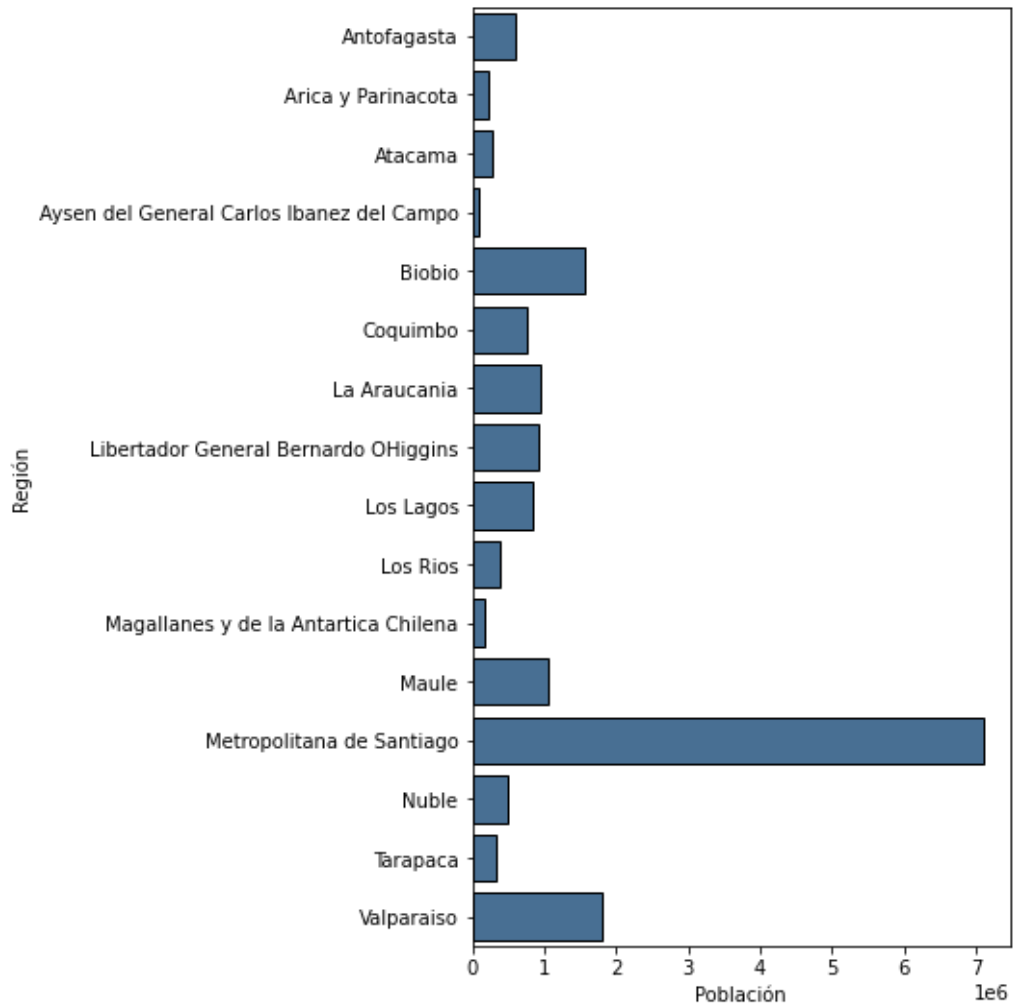


Gráfico 3: Población Regional Censo 2017

La distribución de población a nivel regional es necesaria para calcular la prevalencia de las regiones origen en el contexto de los viajes interregionales.

4.2 Metodología

Los métodos implementados se dividen en dos partes principales:

- a) Métodos para preparación de datos de asertividad de casos
- b) Métodos para los resultados finales

A continuación, se muestra la metodología empleada para la preparación inicial de datos.

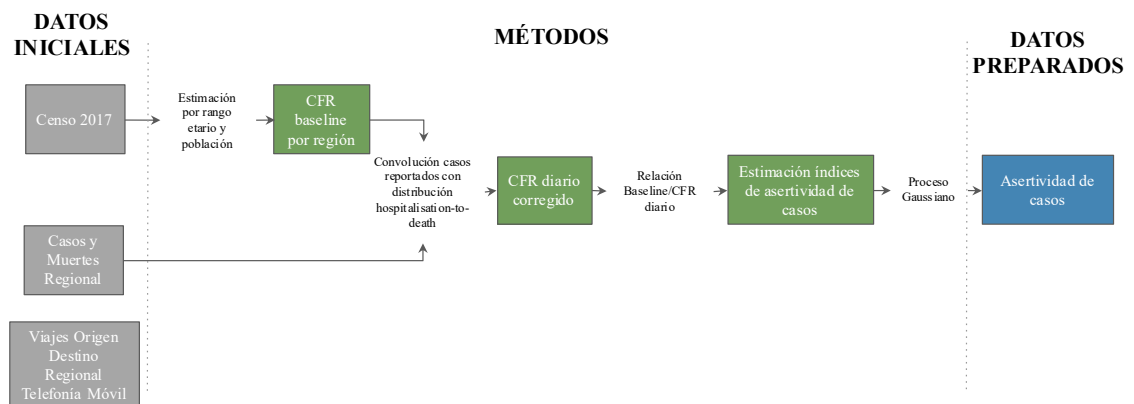


Gráfico 4: Diagrama de metodología para preparación de datos y asertividad

En el gráfico 4 se puede observar que para generar el índice de asertividad de casos, se requieren los datos poblacionales, y de casos y muertes a nivel regional. Dicho índice de asertividad actuará como un tipo de dato preparado para la metodología de resultados finales, la cual se muestra en el siguiente diagrama de flujo:

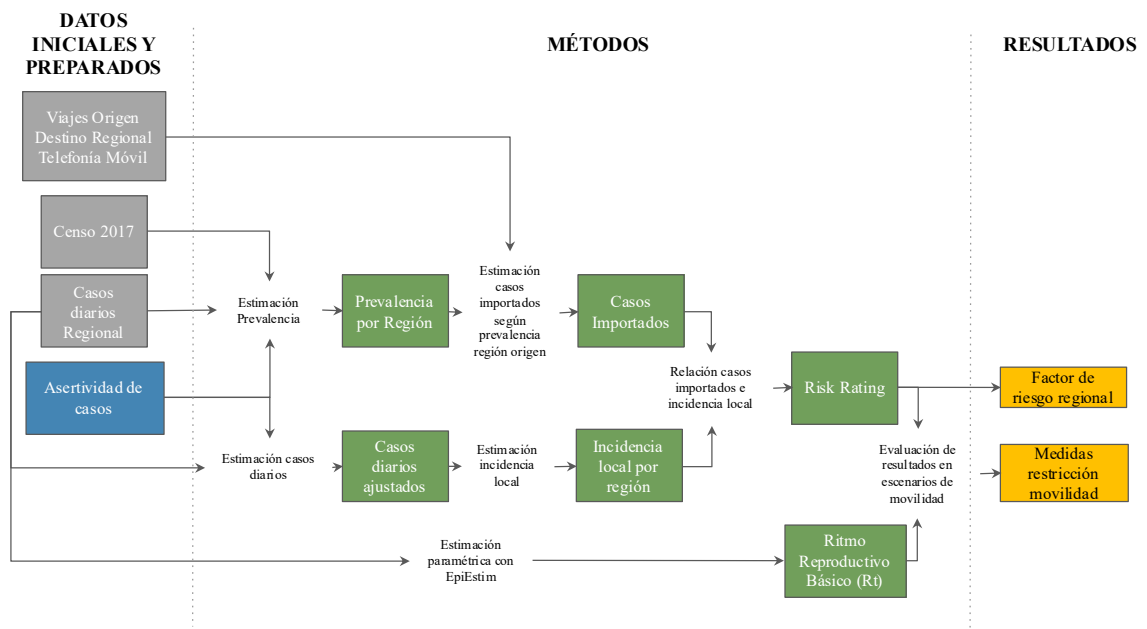


Gráfico 5: Diagrama de métodos para resultados finales

En el gráfico 5 se pueden detallar los métodos y entradas de datos requeridas para calcular las estimaciones de incidencia y prevalencia que dan origen al factor de riesgo regional y a la determinación de medidas de restricción de movilidad. En los siguientes apartados se explicará en detalle cada uno de los métodos abordados para la obtención de los resultados.

A efectos de caracterización de la movilidad interregional, y dado que las INF implementadas han implicado restricciones de movilidad, se procede a definir los escenarios de estudio:

- Movilidad base o BAU (Business as Usual): Datos de viajes interregionales origen-destino para 10 días sin restricciones previo a la pandemia. Fechas: [1 Marzo al 10 Marzo].

- Escenario de Medidas Iniciales: Datos de 10 días de viajes interregionales origen-destino reducidos con respecto al escenario base, que fue cuando se implementaron las primeras INF. Fechas: [8 Mayo al 17 Mayo].
- Escenario de Cuarentena Total: Datos de 10 días de viajes interregionales origen-destino en donde se implementó la cuarentena total en la Región Metropolitana, la cual es la región más poblada de Chile. Fechas: [23 Mayo al 1 Junio].

4.2.1 Cálculo de asertividad de casos por región

Como parte de la metodología referente a la preparación de datos, fue necesario calcular la asertividad de casos por región para análisis posteriores, la cual se compone de los siguientes pasos:

4.2.1.1 CFR base estratificado

El cálculo del CFR base representa el punto de partida dentro del proceso para obtener el nivel de subestimación de casos para cada región de Chile. Este nivel de rigurosidad y que se distancia del trabajo inicial en [14] se basó en los CFR estimados por rangos etarios [15] y su ponderación según cada demografía regional. Este proceso incluyó su aplicación a los extremos superior e inferior de los intervalos de confianza de los CFR, valores utilizados para pasos posteriores en la inferencia bayesiana.

4.2.1.2 CFR diario corregido

Posteriormente, se procede a calcular el CFR diario corregido, para lo que fue utilizada una distribución de retraso, la cual ajusta la cantidad de casos reportada diariamente en las regiones a sus outcomes conocidos ($dC_{r,t}$) para un tiempo posterior t , mediante un método corrección de convolución discreta. La función seleccionada fue la correspondiente a Hospitalización a Muerte [16] modelada como una distribución lognormal de media 13 días (CI 95% 8.7 - 20.9 días) y desviación estándar de 12.7 días.

Seguidamente para cada día se calcula la relación de la incidencia de muertes entre el valor resultante de la convolución para dar lugar al nuevo CFR corregido ($cCFR_{c,t}$).

4.2.1.3 Asertividad de casos

Se calculó la razón entre el CFR base estratificado y el corregido $cCFR$, registrando así la primera aproximación al proceso de estimación de la asertividad de casos de COVID-19 en las regiones de Chile. Este primer indicador permite tener una aproximación a la proporción de casos sintomáticos efectivamente detectados por las autoridades sanitarias. Es relevante destacar que los resultados del cálculo de asertividad de casos a nivel regional están restringidos a generarse a partir de que las regiones de estudio acumulen al menos 10 muertes por COVID-19, dicha restricción fue tomada de la metodología en [6].

El cálculo puntual de asertividad de casos carece de robustez para las tasas de asertividad variables en el tiempo. Debido a esto, se implementó un Proceso Gaussiano descrito en [14], el cual toma en consideración estos cálculos iniciales para la función de verosimilitud del modelo, además de las diferentes fuentes de incertidumbre y ruido que están involucrados bajo un framework bayesiano.

4.2.2 Cálculo de incidencia, prevalencia, casos importados y calificación de riesgo de contagio

En primer lugar, se estiman las infecciones a partir del resultado de la curva de asertividad de casos para cada región. Esto implica la relación del número de casos diarios reportados entre el índice de asertividad de casos por día para posteriormente dividir entre el valor de la proporción de casos asintomáticos, la cual fue considerada en un 50% con un intervalo de confianza [10%,70%], misma proporción e intervalo utilizado en el estudio [6]. Finalmente, y para obtener la estimación de la incidencia de casos para cada región

destino, se calcula el promedio de infecciones diarias dentro de un intervalo de tiempo definido.

La prevalencia de casos en las regiones origen fue estimada con una granularidad diaria, a partir de la suma de nuevos casos de los 10 días anteriores, la cual fue luego convertida a proporción al ser dividida entre la población regional. Posteriormente, fue ajustada sobre la proporción de casos asintomáticos y los índices de asertividad de casos. A partir de la prevalencia calculada se procedió a estimar el valor de importaciones de casos esperados por día por región, multiplicando el valor de prevalencia por la cantidad de viajes a las regiones destino y promediando los valores resultantes por región destino y ventana de tiempo por escenario. Adicionalmente, dado que la muestra de viajes representa un 29-32% de la cantidad de abonados móviles en Chile [5], se aproximó dicha proporción a 0.3, y se dividió la cantidad de viajes entre este valor para poder estimar la totalidad de los viajes.

Seguidamente, se calcularon los valores de calificación de riesgo dividiendo, para el período de tiempo de estudio, el promedio de casos importados esperados entre la incidencia total por región. Luego, se estratificaron las regiones en tres rangos de riesgo: menor a 1%, entre 1% y 10% y mayor a 10%, valores que determinarán el efecto de los casos importados por los viajes interregionales para cada región.

4.2.3 Estimación de Ritmo Reproductivo Básico R_t

La estimación del Ritmo Reproductivo Básico (R_t) para cada una de las regiones del país fue realizada utilizando la herramienta de acceso público EpiEstim, la cual se encuentra disponible como un paquete de R. Esta posibilita cuantificar la transmisibilidad de una pandemia a partir de curvas de incidencia tal como se describe en [24]. El proceso de estimación fue realizado de manera paramétrica considerando la incidencia de casos extraída de las fuentes oficiales del Ministerio de Salud y un intervalo serial descrito por

[23] como una distribución normal de media 5.29 días y con una desviación estándar de 5.32 días.

5. Resultados

5.1 CFR Base por región

A modo de ajustar los valores de CFR a utilizar por región para el cálculo de los índices de asertividad de casos respecto a la población de dichas regiones, se procedió a calcular el valor de CFR considerando la estratificación por edades y población regional, para lo que se obtiene el siguiente resultado:

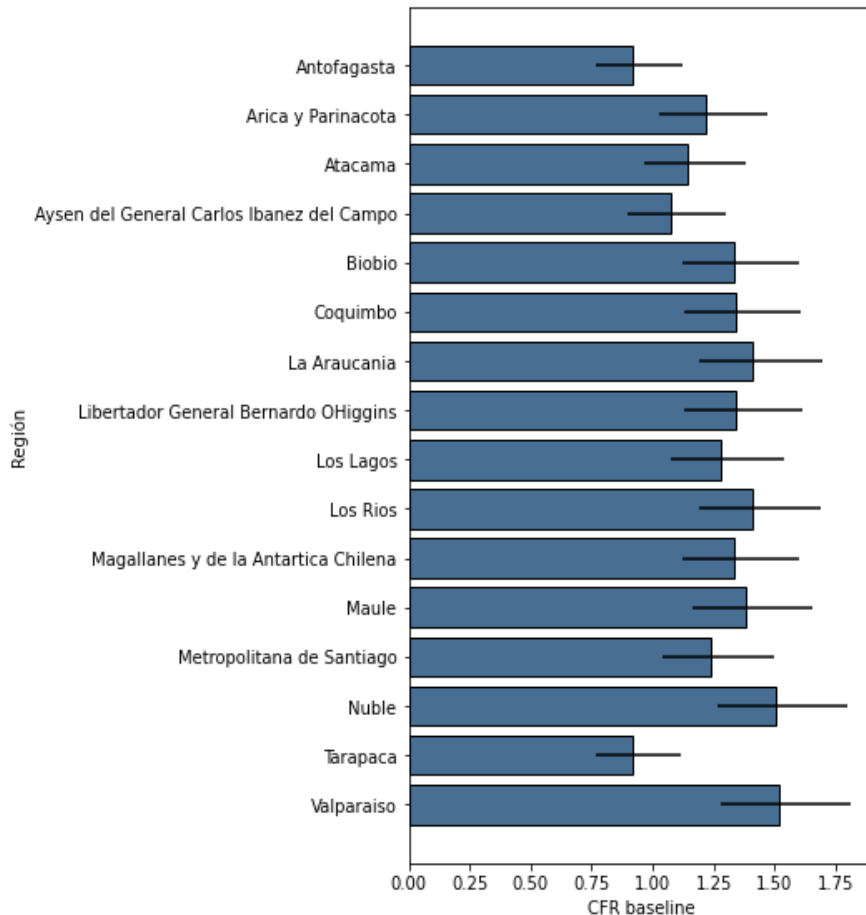


Gráfico 6: CFR según demografía y estratificación de edades Regional

Los valores del gráfico 6 corresponden al CFR por región con su respectivo intervalo de confianza. Como referencia se tiene el CFR utilizado en [6] para el cálculo de índices de asertividad de casos por países en donde el valor del CFR base es de 1.4 con intervalo de confianza de [1.2,1.7]. En dicha referencia se utilizó el mismo valor de CFR para estimar los índices de asertividad de casos para distintos países, aun así, los autores sugirieron la metodología para el cálculo de dichos valores de acuerdo a la estratificación de edades y población. Esta metodología fue aplicada en este trabajo para obtener resultados más precisos. Se obtuvieron valores de CFR incluso menores a 1 en regiones como Tarapacá y Antofagasta mientras que en Valparaíso y Ñuble sobrepasa el 1.5.

5.2 Estimación Asertividad de casos diaria por región

Una vez obtenidos los CFR base por región, se procede a calcular los índices de asertividad diarios, los cuales se obtienen a partir de la división entre el CFR baseline y el delay-adjusted case fatality ratio, el cual a su vez proviene de la división de las muertes diarias entre el valor resultante del método de convolución discreta de casos para ese día. A continuación, se muestra el resultado temporal de dichos índices de asertividad:

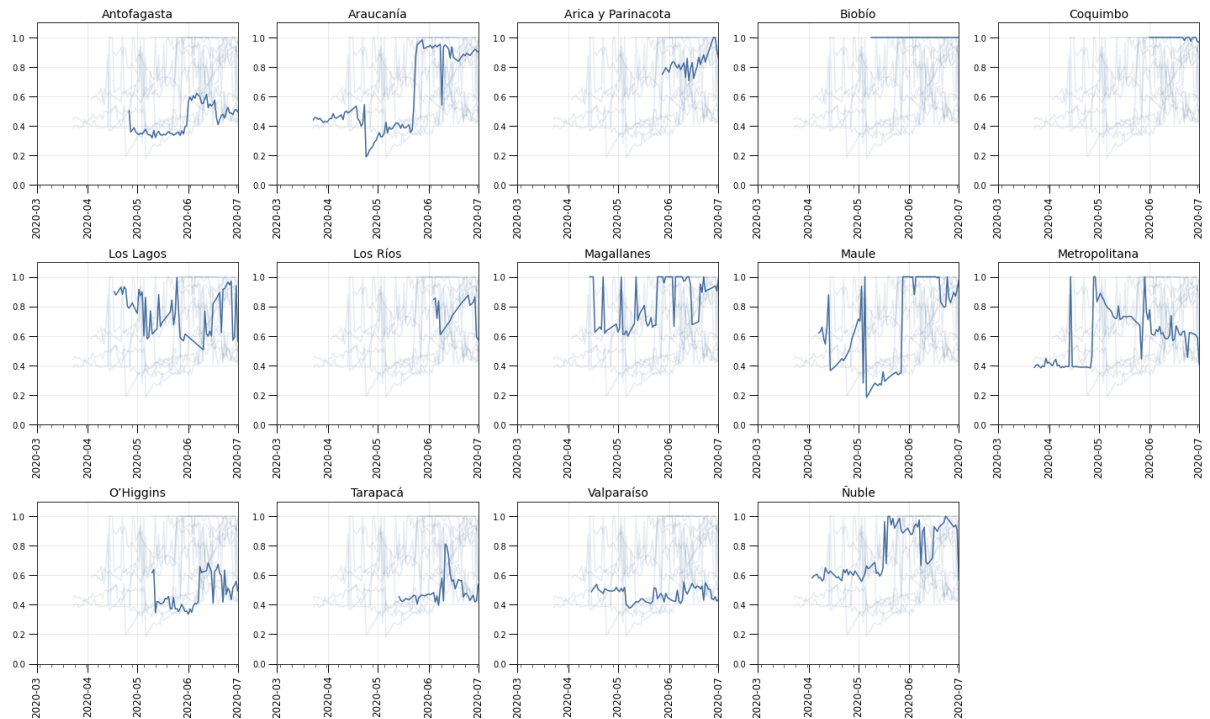


Gráfico 7: Valores iniciales índices de asertividad de casos por región

En el gráfico 7 se pueden observar cómo los índices de asertividad reflejan diferentes características correspondientes a los datos de casos y muertes confirmadas. El inicio de los diferentes valores para cada región no es uniforme, ya que estos índices están restringidos a generarse a partir de que la región de estudio acumule al menos 10 muertes confirmadas por COVID-19, por esta razón la mayoría de las regiones comienzan a presentar datos durante el mes de Abril. Sin embargo, existen otras como Arica y Parinacota o Los Ríos donde el inicio de los cálculos puntuales de asertividad se presentan desde el mes de junio mientras que las regiones de Aysén y Atacama no presentaron suficientes casos confirmados y muertes para los períodos de estudio abordados. Estos resultados puntuales, si bien comienzan a mostrar tendencias para la asertividad regional, están propensos a cambios bruscos en los reportes oficiales, dado que sus valores corresponden a una relación entre otros dos valores (CFR baseline y ajustado).

5.3 Asertividad diaria de casos por región

A los valores iniciales de índices de asertividad de casos por región mostrados en el gráfico 7 se les aplica el Proceso Gaussiano con la configuración mencionada en la metodología para así obtener la tendencia de la proporción de casos reportados por región, los cuales se muestran en el gráfico 8 en conjunto a sus intervalos de confianza resultantes:

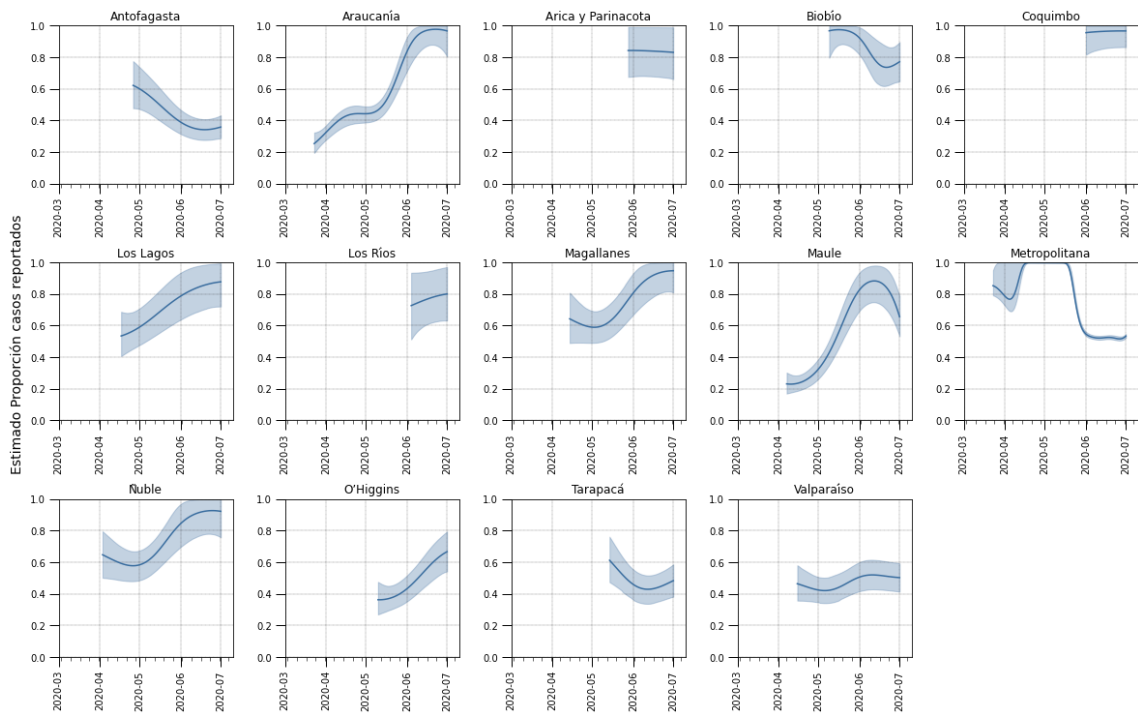


Gráfico 8: Función posterior de índice de asertividad de casos por región

A partir de los índices calculados mostrados en el gráfico 8 será posible ejecutar la estimación de casos reales por región. Se puede observar que el comportamiento de la certeza de los casos reportados por región y la amplitud del intervalo de confianza en el tiempo varía dependiendo de la región, esto debido a que cada una posee distinta situación de casos, muertes, densidad poblacional e incluso diferencia en la capacidad y estrategia de testeo. Se destaca también la similitud de la tendencia de la Región Metropolitana (la cual contiene la mayor cantidad de población, casos y muertes) con el resultado de índices de asertividad del total nacional tal como se muestra en el siguiente gráfico.

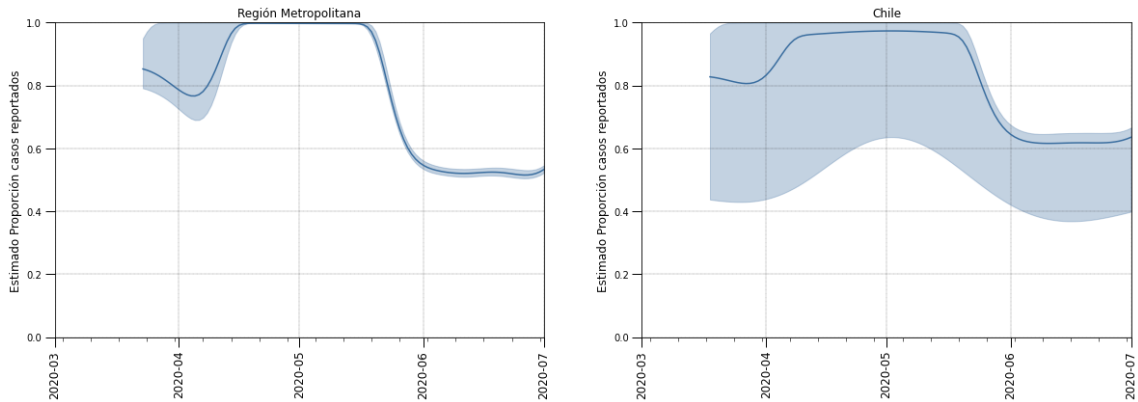


Gráfico 9: Comparación de Índice de asertividad de casos entre la Región Metropolitana y Chile

En este gráfico 9 se observa como el país presentó un comportamiento inestable de la asertividad durante los primeros meses de la pandemia. La similitud entre el desempeño de la Región Metropolitana con el del total nacional es evidente durante este periodo de tiempo, esto posiblemente debido, no sólo a la gran concentración de población de esta región, sino también a su desarrollo temprano de la epidemia con respecto a otras localidades, especialmente en el norte del país.

5.4 Escenarios de Movilidad Interregional

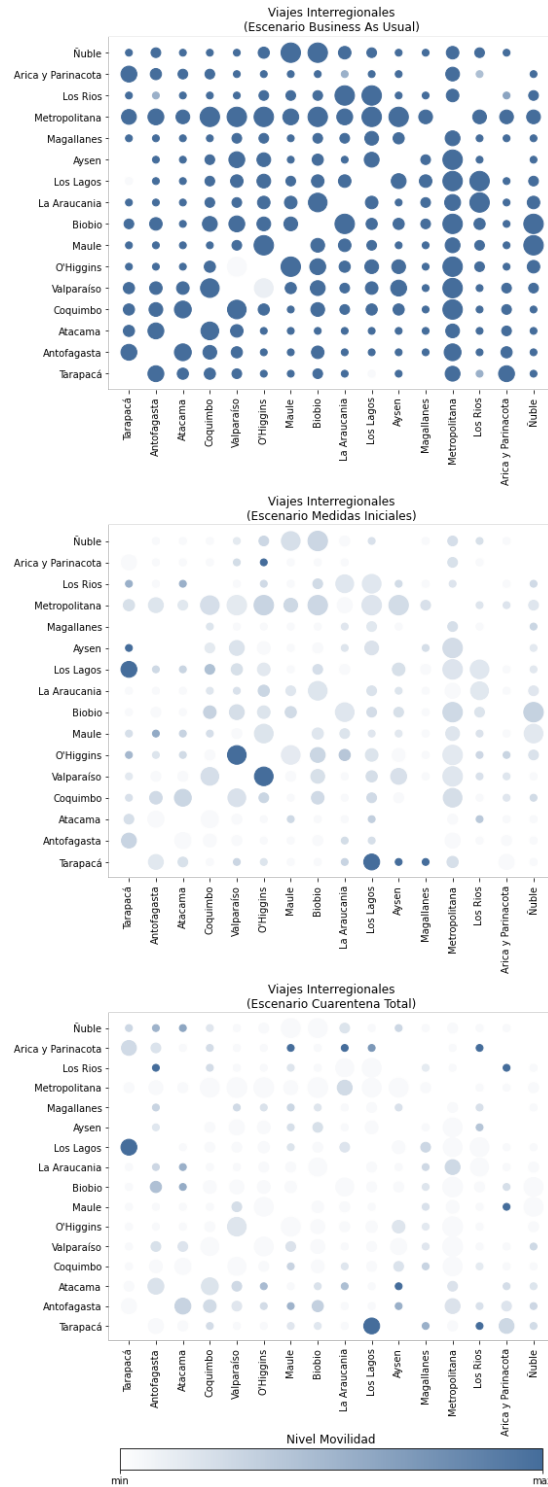


Gráfico 10: Matriz de movilidad interregional durante los tres escenarios estudiados

La visualización de los viajes interregionales presentada en el gráfico 10 permite apreciar cómo la mayor movilidad para cada desplazamiento entre regiones, observada mediante el canal de opacidad, se consigue durante el escenario previo a las restricciones no farmacológicas. Sin embargo, se destaca como futura revisión los datos obtenidos para la movilidad entre Los Lagos y Tarapacá, ya que presentan un comportamiento inusual en donde los viajes entre ellas aumentan en tres órdenes de magnitud durante los escenarios de restricciones. Visualmente se comprueba la reducción de movilidad entre el escenario de normalidad o BAU e INF parciales (Medidas Iniciales), mientras que la reducción es menos evidente entre esta última y la cuarentena total en Santiago y otras regiones del país.

La reducción de viajes con origen y destino a la Región Metropolitana hace que prácticamente desaparezca del gráfico durante el tercer escenario. Esto corresponde a los efectos esperados del lockdown implementado en la región luego del 17 de mayo del 2020. Durante este momento crítico de la pandemia esta región concentraba un número alto de casos confirmados y una asertividad por debajo del 50%. A pesar de que se observa un patrón geográfico claro en donde las regiones cercanas presentan una alta movilidad entre ellas mientras que las lejanas una mucho menor, esto no se cumple con la Región Metropolitana, la cual a pesar de encontrarse lejana de Aysén, Los Lagos y Antofagasta, presenta un elevado número total de viajes lo cual se ve representado con las circunferencias del mayor diámetro posible.

5.5 Ritmo Reproductivo Básico (Rt) calculado

De acuerdo a la metodología aplicada para la obtención de resultados, la cual puede apreciarse de manera resumida en el gráfico 5, se procede a calcular el valor de Ritmo Reproductivo Básico (Rt) utilizando métodos paramétricos, los cuales son provistos herramienta de acceso público EpiEstim. A continuación, se muestran los Rt calculados para todas las regiones de Chile:

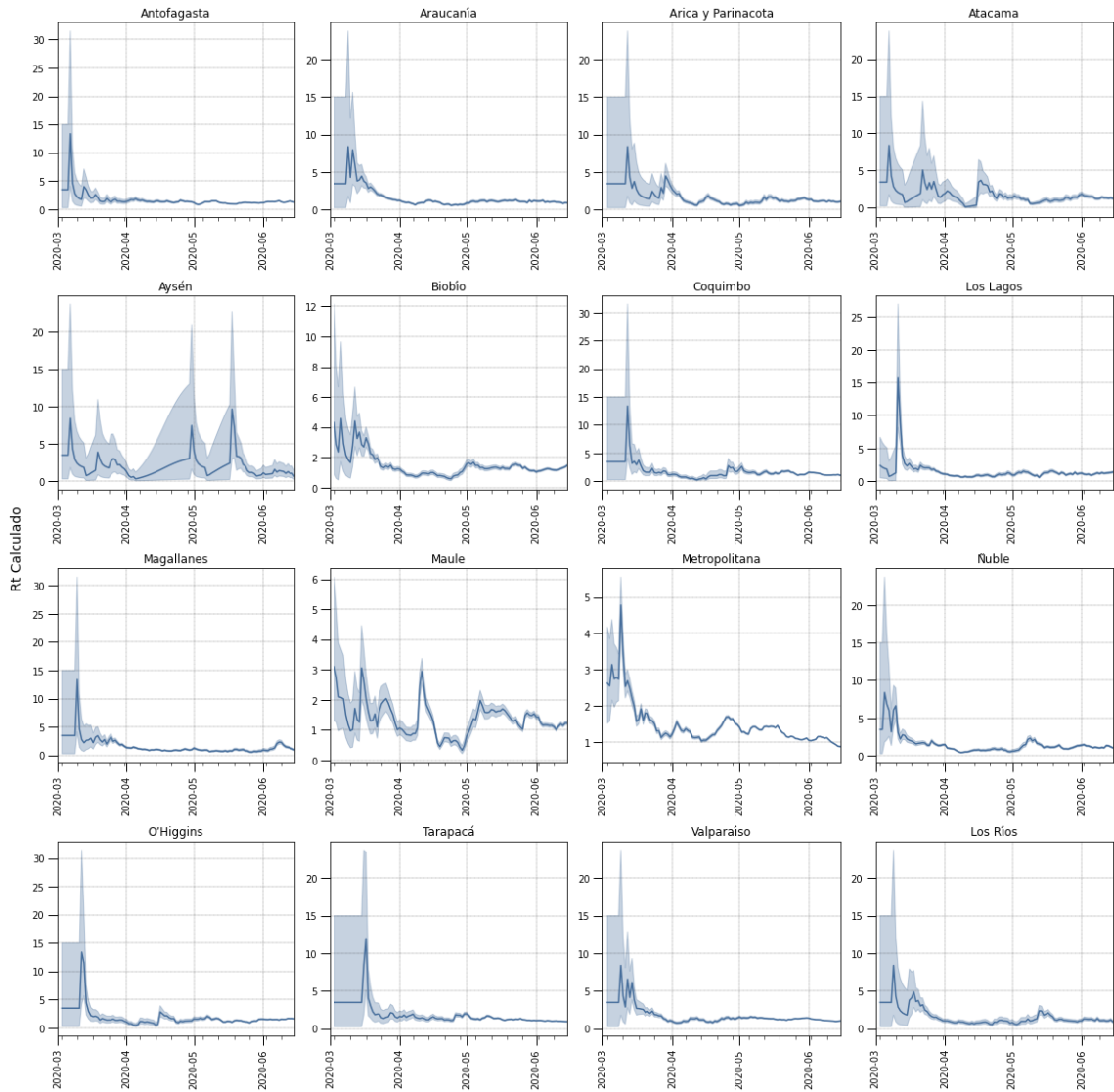


Gráfico 11: Ritmo Reproductivo Básico (Rt) calculado para las regiones de Chile

En el gráfico 11 se puede observar que los Rt calculados poseen valores poco estables con un intervalo de confianza bastante amplio para el inicio de la pandemia en todas las regiones, esto puede ser causa de la escasa estabilidad en el reporte de casos en el inicio de la misma donde los procedimientos de testeo y conteo de casos se encontraban en continuo desarrollo. En la tendencia temporal se observa que en la mayoría de las regiones, el Rt se estabiliza, marcando valores con cambios menos abruptos en el tiempo y con intervalos de confianza reducidos con respecto al inicio de la tendencia.

5.6 Risk Rating por Región

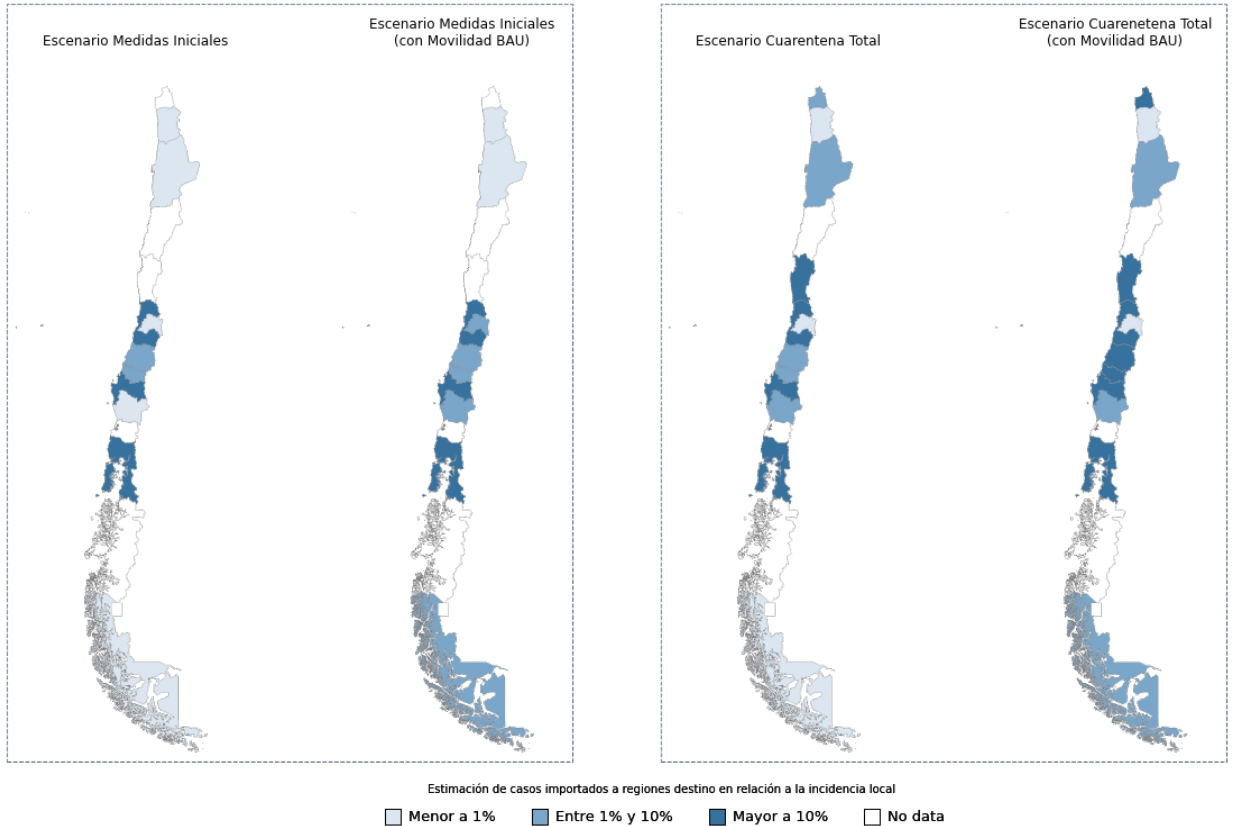


Gráfico 12: Estimación de casos importados a regiones destino en relación a la incidencia local (Risk Rating)

En el gráfico 12 se pueden apreciar los valores del indicador de riesgo (risk rating) para los escenarios de estudio. Las regiones que no presentan datos es porque a la fecha de los escenarios de estudio no contaban con al menos 10 muertes confirmadas por COVID-19. Al comparar los escenarios de medidas iniciales (I) y cuarentena total (II), ambos a la izquierda de cada recuadro punteado, se observa cómo el risk rating ha comenzado a incrementarse en las regiones, teniendo en el primer escenario 5 de 11 regiones un indicador de riesgo menor a 1% mientras que en el segundo escenario se tienen para este valor sólo 3 regiones de 13, lo que justificaría la aplicación de mayores medidas de restricción para la movilidad interregional. Esto se confirma si se considera que el 77%

regiones con datos disponibles para este escenario II presentan un factor de riesgo mayor a 1%, lo que se traduce en un aporte significativo en la incidencia local para una gran parte de la población del país.

Contrastando los mismos escenarios (para los que ya se había aplicado restricciones) pero bajo una movilidad interregional pre-pandemia (BAU), se aprecia cómo las medidas para la disminución de viajes interregionales tendrían una mayor justificación ya que no sólo se aprecian regiones superando el 1% del factor de riesgo sino que es notorio que dicho factor alcance incluso valores mayores al 10% en varias de ellas.

Uno de los aspectos más importantes de estos resultados pertenece al comportamiento de la Región Metropolitana que, a pesar de concentrar un alto número de casos de COVID-19 en su incidencia local, el risk rating permanece siempre por debajo del 1% excepto para el escenario I con movilidad BAU. Es decir, a pesar de ser una región que podría verse afectada por la importación de casos, cuenta con una incidencia local suficientemente alta para que los casos importados no representen un mayor riesgo en ella.

5.7 Análisis de casos exportados por región

Se elaboró una representación de los casos exportados de cada región hacia el resto del país. Esto con la finalidad de mostrar la influencia de la movilidad interregional y como se componen los casos importados que ya fueron estudiados en las visualizaciones anteriores. En general, se debe destacar que las regiones que se encuentran presentes en el gráfico son aquellas, que a la fecha presentaban al menos 10 muertes confirmadas por COVID-19. A continuación, se muestran estos resultados haciendo uso de diagramas Sankey para los dos escenarios de pandemia estudiados: medidas iniciales y cuarentena total.

Casos importados Escenario Medidas Iniciales

Casos importados Escenario Cuarentena Total

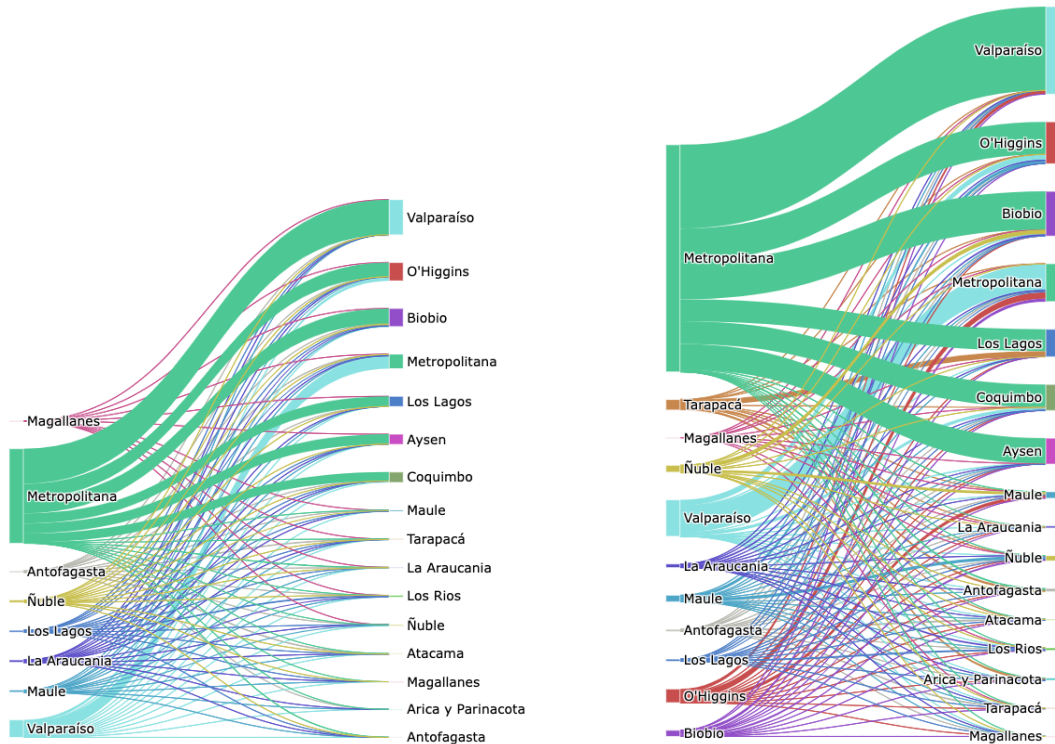


Gráfico 13: Casos exportados durante los escenarios de medidas iniciales y cuarentena total

En el gráfico 13 se puede comprobar como la Región Metropolitana, en ambos casos, fue determinante en la exportación de casos al resto del país. Además, la proporción de estos casos provenientes de dicha región en el resto de las localidades estudiadas es considerablemente alta. Regiones como Valparaíso, Biobío, O'higgins, Los Lagos y Coquimbo, las cuales ya presentaban un número total de casos elevado, en todas ellas la Región Metropolitana representó al menos un 85% de casos importados.

Al comparar la exportación de casos entre ambos escenarios se evidencia cómo la distribución en el flujo de casos positivos se mantiene constante siendo la Región Metropolitana la principal responsable en la extensión del virus al resto del territorio chileno. Además, se comprueba un aumento general en el flujo de casos importados entre

las diferentes regiones, aunque se puede destacar que dicho aumento no se debe a un incremento en la movilidad interregional, ya que en el gráfico 10 se comprueba que entre el Escenario Medidas Iniciales y Escenario Cuarentena Total hay reducción de movilidad. Por lo tanto, el aumento de los casos importados se debe al crecimiento en la cantidad de casos en todas las regiones, el cual afecta directamente al valor de prevalencia en las regiones origen.

5.8 Análisis Risk Rating vs. Ritmo Reproductivo Básico (Rt)

Una vez calculado el indicador de riesgo se procede a comparar estos resultados obtenidos con el valor calculado del Ritmo Reproductivo Básico (Rt) de cada región. De acuerdo a la metodología utilizada en [6], se tiene por definición que cualquier cambio en situación pandémica puede impactar negativamente en la misma si el Rt se encuentra en un punto de estabilización o en un lento decremento e incremento. Dado esto, se considera una situación pandémica en lento decremento si los valores de Rt se encuentran entre $[0.95, 1)$, en estado estable si $Rt=1$ y en lento incremento si Rt se encuentra en el intervalo $(1, 1.05]$. Por otra parte, se considera que la epidemia está en decremento si el valor de Rt es menor a 0.95 y en incremento si es mayor a 1.05 .

En consecuencia a lo mencionado anteriormente, las recomendaciones de restricciones de movilidad, de acuerdo a la metodología en [6] se condicionarán de la siguiente manera:

- Si el valor de Rt es menor a 0.95 y el risk rating es menor a 1%, las restricciones de movilidad en las regiones destino tendrán mínimo impacto ya que los casos importados no afectan significativamente a la incidencia local, y además de acuerdo al valor de Rt, la epidemia se encuentra en decremento.
- Si el valor de Rt es mayor a 1.05 y el risk rating es menor a 1%, las restricciones de movilidad en las regiones destino tendrán mínimo impacto ya que los casos

importados no son relevantes en magnitud con respecto a la incidencia local y de acuerdo al valor de R_t la epidemia se encuentra en incremento. Esto genera un aporte mínimo a la pandemia por parte de los casos importados.

- Las restricciones de movilidad a las regiones destino tendrán impacto sustancial si el risk rating es mayor a 1% o si para valores del indicador de riesgo menor a 1% se tiene que el R_t se encuentra en el intervalo $[0.95, 1.05]$, esto se justifica en que el R_t se encuentra en valores que pueden representar fácilmente un punto de inflexión de la epidemia, por lo que cualquier incidencia externa podría afectar la situación de pandemia en dicha región.

En el gráfico 14 se muestran los valores de R_t vs. risk rating por región, así como la cantidad de casos importados a las mismas para el escenario de medidas iniciales con la movilidad a la fecha y movilidad BAU:

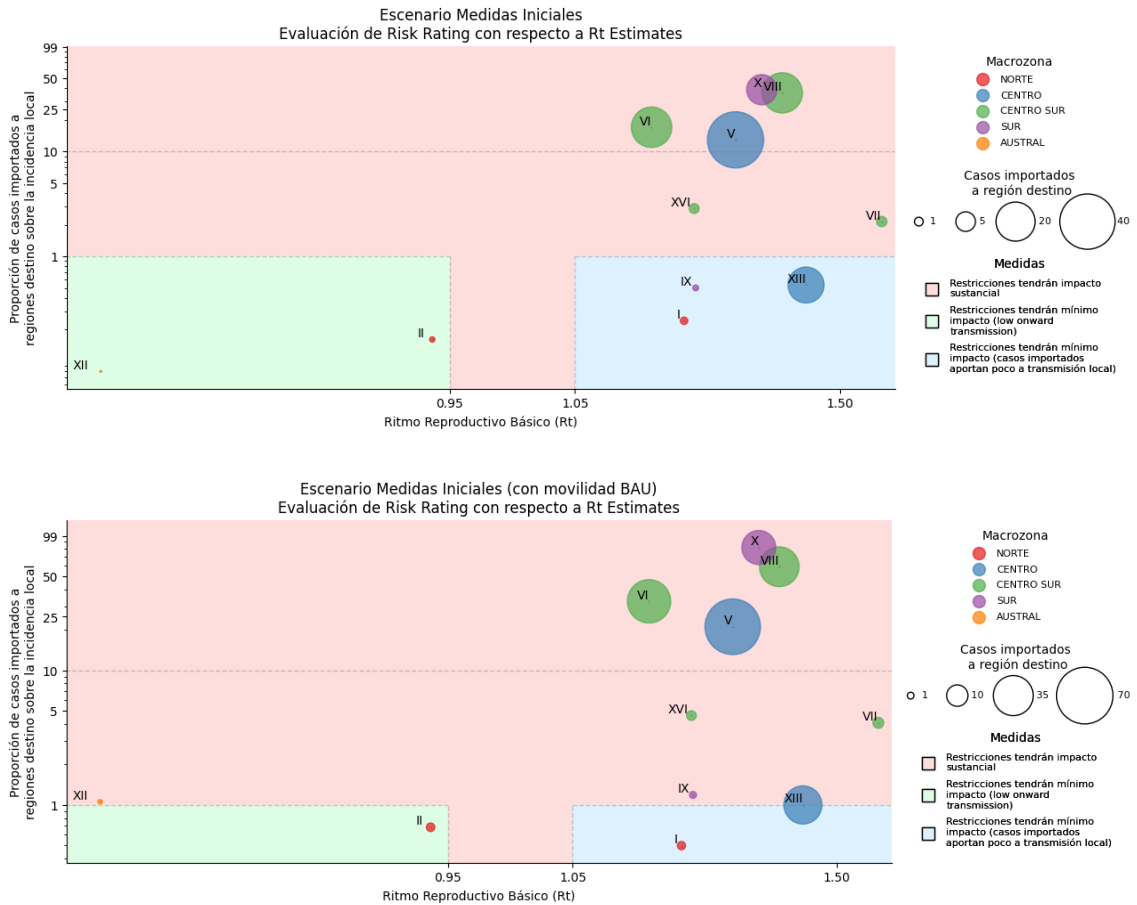


Gráfico 14: Determinación de medidas. Escenario Medidas Iniciales con movilidad de la fecha y Business As Usual

En este escenario de medidas iniciales, y de acuerdo a los valores resultantes de risk rating vs. Rt, se puede destacar lo siguiente:

- Se observa que la macrozona Centro Sur, en toda su extensión, mantiene el indicador de riesgo sobre el 1% e incluso dos de ellas, O'Higgins (VI) y Biobío (VIII), presentan este indicador por encima de 25%. Esto demuestra que las restricciones en la zona eran necesarias debido a su alto impacto en el control de la pandemia.

- La región destino que posee mayor cantidad de casos importados es la región de Valparaíso (V Región). Además, esto se traduce en un risk rating mayor del 10% por lo que, según la metodología seguida [6], se recomendaría aplicar restricciones de movilidad interregional debido a su impacto sustancial en el desarrollo de la pandemia. Por otro lado, su región vecina (XIII, Región Metropolitana) se encuentra en estado creciente de la pandemia ($R_t > 1,05$) por lo que los casos importados sumarían poco a la propagación local. Sin embargo, existe la posibilidad de que esta región genere gran cantidad de casos importados por su alto movimiento con la gran mayoría de regiones del país, tal como se observó en el Gráfico 9 .
- Las restricciones de movilidad tendrían mínimo impacto en las regiones de la macrozona Norte ya que la región de Antofagasta (II) se encuentra en estado de pandemia en decremento, la región de Tarapacá (I) se encuentra en estado de pandemia en aumento y ambas tienen un indicador de riesgo menor a 1%.
- La región de Magallanes (XII) es la que tiene mejores valores de risk rating y R_t (los menores), por lo que las restricciones de viajes de entrada tendrían poco impacto.

En el caso de que el escenario medidas iniciales tuviese la movilidad BAU se tendría un incremento sustancial de casos importados en todas las regiones y de acuerdo a las condiciones definidas, las únicas regiones a las cuales no se deberían aplicar restricciones de viajes interregionales serían las de la macrozona Norte (I y II). Es importante destacar que el cambio de movilidad implicaría un inminente cierre de la Región Metropolitana (XIII) ya que aumentaría su indicador de riesgo a 1%, lo que sería una medida no menor, ya que afectaría a la mayor concentración de población regional en el país.

En el gráfico 15 se muestran los valores de R_t vs. indicador de riesgo por región, así como la cantidad de casos importados a las mismas para el escenario de cuarentena total con la movilidad a la fecha y movilidad BAU:

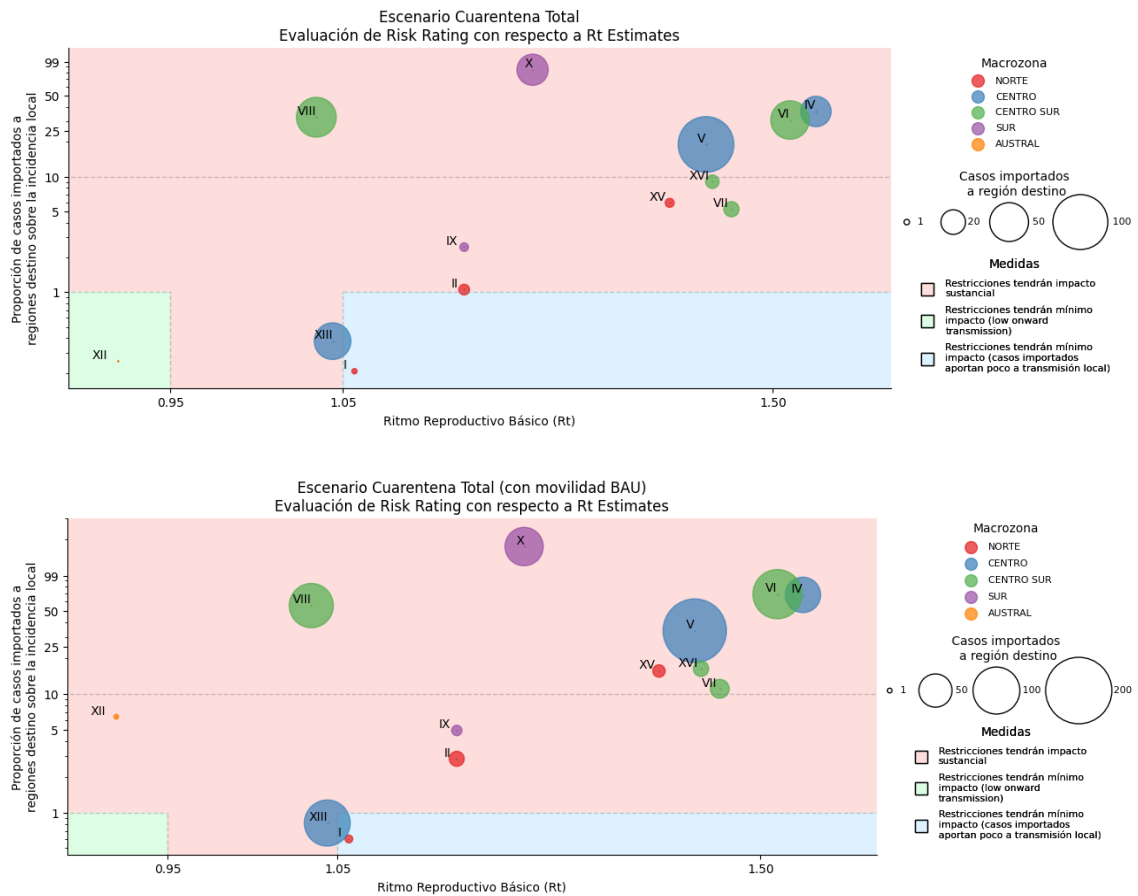


Gráfico 15: Determinación de medidas. Escenario Medidas Iniciales con movilidad de la fecha y Business As Usual

Del escenario de cuarentena total mostrado en el gráfico 15 se puede destacar lo siguiente:

- Se puede observar que, a pesar de haberse reducido la movilidad, los indicadores de riesgo para cada región han aumentado de manera general respecto al escenario Medidas Iniciales.

- Con respecto a la Región Metropolitana (XIII) se tiene que a pesar de tener un risk rating menor a 1%, el valor de R_t indica que la epidemia está en aumento paulatino por lo que se recomienda la restricción de viajes de entrada.
- Sólo dos regiones estarían exentas de restricciones de movilidad, las cuales son Magallanes (XII) y Tarapacá (I).
- En comparación a los escenarios de medidas iniciales se puede apreciar un crecimiento de casi el doble de casos importados en la región de Valparaíso (V) la cual es la que registra nuevamente un mayor número en importación de casos.
- La región de Los Lagos (X) no registra el número mayor de casos importados pero dichos casos afectan de gran manera la incidencia local por lo que su factor de riesgo supera el 50%.

En el caso de que el escenario epidemiológico presentado durante la cuarentena total tuviese la movilidad BAU se tendría un gran incremento en los casos importados por región. Sin embargo, respecto a las medidas recomendadas en la metodología sólo correspondería aplicar nuevas restricciones a la región de Magallanes (XII). La región de Tarapacá (I) podría continuar sin restricciones de viajes de entrada mientras que se sugiere aplicar medidas de restricción para el resto de las regiones del país.

5.9 Sumarización de resultados

En las tablas 1 y 2 se muestra la sumarización de resultados para los escenarios estudiados con sus intervalos de confianza correspondientes:

Código Región	Región	Escenario Medidas Iniciales				Escenario Medidas Iniciales (con movilidad BAU)	
		Casos Importados a regiones destino por día (95% CI)	Casos locales por día (95% CI)	Risk Rating%	Rt (99.5% CI)	Casos Importados a regiones destino por día (95% CI)	Risk Rating%
1	Tarapacá	0.74 (0.34, 1.53)	302.07 (135.59, 646.79)	0.002	1.17 (1.08, 1.27)	1.51 (0.73, 2.99)	0.005
2	Antofagasta	0.38 (0.21, 0.64)	235.78 (108.02, 491.84)	0.002	0.94 (0.85, 1.03)	1.61 (0.89, 2.69)	0.007
3	Atacama	0.66 (0.3, 1.38)	No data	No data	1.0 (0.7, 1.38)	1.46 (0.7, 2.95)	No data
4	Coquimbo	12.25 (6.63, 21.07)	No data	No data	1.48 (1.24, 1.75)	21.93 (11.83, 37.84)	No data
5	Valparaíso	41.34 (22.9, 68.74)	321.13 (148.51, 659.75)	0.129	1.25 (1.16, 1.34)	67.69 (37.49, 112.6)	0.211
6	O'Higgins	21.47 (11.47, 37.51)	126.49 (55.76, 272.53)	0.17	1.13 (0.98, 1.3)	41.2 (22.29, 70.79)	0.326
7	Maule	1.37 (0.67, 2.67)	63.73 (29.9, 129.37)	0.021	1.7 (1.52, 1.89)	2.59 (1.28, 5.03)	0.041
8	Biobío	21.19 (11.52, 36.27)	58.72 (31.73, 112.12)	0.361	1.34 (1.2, 1.49)	34.55 (18.73, 59.36)	0.588
9	Araucanía	0.45 (0.25, 0.76)	90.22 (45.24, 171.53)	0.005	1.19 (1.03, 1.36)	1.07 (0.59, 1.81)	0.012
10	Los Lagos	11.97 (6.63, 19.91)	30.96 (14.36, 63.81)	0.387	1.3 (1.05, 1.58)	25.31 (14.01, 42.14)	0.818
11	Aysén	12.03 (6.64, 20.11)	No data	No data	2.37 (0.09, 12.63)	20.43 (11.28, 34.17)	No data
12	Magallanes	0.03 (0.02, 0.06)	40.74 (19.26, 81.52)	0.001	0.77 (0.57, 1.0)	0.43 (0.24, 0.73)	0.011
13	Metropolitana	16.97 (7.87, 34.85)	3182.83 (1761.84, 5294.08)	0.005	1.4 (1.38, 1.41)	31.83 (14.76, 65.4)	0.01
14	Los Ríos	2.05 (1.0, 4.04)	No data	No data	2.1 (1.65, 2.63)	4.61 (2.26, 8.98)	No data
15	Arica y Parinacota	0.02 (0.01, 0.04)	No data	No data	1.58 (1.31, 1.87)	0.3 (0.16, 0.52)	No data
16	Nuble	1.28 (0.59, 2.61)	44.75 (21.56, 89.35)	0.029	1.19 (1.01, 1.38)	2.06 (0.97, 4.19)	0.046

Tabla 1: Sumarización de Resultados. Escenario Medidas iniciales (movilidad a la fecha y BAU)

Código Región	Región	Escenario Cuarentena Total				Escenario Cuarentena Total (con movilidad BAU)	
		Casos Importados a regiones destino por día (95% CI)	Casos locales por día (95% CI)	Risk Rating%	Rt (99.5% CI)	Casos Importados a regiones destino por día (95% CI)	Risk Rating%
1	Tarapacá	0.97 (0.45, 1.98)	467.89 (214.99, 983.51)	0.002	1.06 (0.99, 1.13)	2.8 (1.4, 5.31)	0.006
2	Antofagasta	3.81 (1.82, 7.62)	361.27 (166.88, 747.34)	0.011	1.14 (1.05, 1.23)	10.23 (5.03, 19.88)	0.028
3	Atacama	1.13 (0.52, 2.32)	No data	No data	1.85 (1.52, 2.22)	2.97 (1.45, 5.82)	No data
4	Coquimbo	30.71 (16.6, 52.77)	83.66 (44.44, 163.26)	0.367	1.59 (1.45, 1.74)	57.02 (30.74, 98.3)	0.682
5	Valparaíso	103.01 (56.38, 174.02)	541.0 (253.33, 1095.72)	0.19	1.39 (1.33, 1.46)	183.93 (100.99, 309.28)	0.34
6	O'Higgins	49.29 (26.25, 86.35)	159.09 (73.82, 326.58)	0.31	1.53 (1.39, 1.68)	110.04 (59.34, 189.68)	0.692
7	Maule	7.68 (3.56, 15.83)	146.64 (70.89, 294.14)	0.052	1.43 (1.34, 1.53)	16.16 (7.54, 33.13)	0.11
8	Biobío	52.65 (28.55, 90.19)	160.7 (84.68, 299.92)	0.328	1.03 (0.95, 1.12)	88.99 (48.16, 152.93)	0.554
9	Araucanía	2.48 (1.35, 4.41)	100.99 (50.13, 197.21)	0.025	1.14 (1.01, 1.27)	4.96 (2.69, 8.79)	0.049
10	Los Lagos	32.45 (17.23, 57.27)	38.45 (17.89, 79.21)	0.844	1.2 (1.01, 1.4)	66.95 (36.91, 111.89)	1.741
11	Aysén	30.53 (16.79, 51.22)	No data	No data	1.07 (0.37, 2.35)	54.0 (29.7, 90.58)	No data
12	Magallanes	0.04 (0.02, 0.08)	17.46 (8.33, 35.08)	0.003	0.92 (0.64, 1.28)	1.12 (0.61, 1.89)	0.064
13	Metropolitana	44.58 (20.77, 91.48)	11814.97 (6373.32, 20171.0)	0.004	1.04 (1.03, 1.06)	96.27 (44.62, 198.4)	0.008
14	Los Ríos	2.95 (1.44, 5.77)	No data	No data	1.05 (0.81, 1.33)	6.9 (3.41, 13.33)	No data
15	Arica y Parinacota	2.68 (1.21, 5.71)	45.07 (21.28, 93.48)	0.059	1.34 (1.18, 1.52)	7.02 (3.22, 14.66)	0.156
16	Nuble	6.03 (3.01, 11.85)	66.55 (32.04, 134.39)	0.091	1.4 (1.24, 1.58)	10.83 (5.41, 21.21)	0.163

Tabla 2: Sumarización de Resultados. Escenario Cuarentena Total (movilidad a la fecha y BAU)

Estos resultados resumizados en las tablas 1 y 2 contienen la información presentada en los gráficos 11, 12, 13 y 14, en caso de que se requiera explorar los valores numéricos exactos obtenidos y sus respectivos intervalos de confianza.

6. Conclusiones y Trabajo Futuro

Los resultados obtenidos y sus respectivas visualizaciones permiten distinguir aspectos relevantes respecto al desarrollo de la pandemia a nivel regional y verificar el efecto de las restricciones de viajes interregionales en dos escenarios claves de la pandemia. En primer lugar, se observó mediante el gráfico 6 la heterogeneidad, y por tanto, la importancia de haber ajustado los Case Fatality Ratio según la demografía de cada región. Las medias de los CFR y sus respectivos intervalos de confianza varían de manera significativa, mientras algunas regiones del norte presentan resultados cercanos al 0.9%, existen otras, correspondientes al centro y sur del país, como Valparaíso y Ñuble que alcanzan el 1.5%.

Las curvas obtenidas referidas a la proporción de casos reportados efectivamente por parte de las autoridades sanitarias evidencian un comportamiento mixto en las diferentes regiones del país. Por ejemplo, en la Región Metropolitana se puede observar las consecuencias del salto que tuvo el reporte de muertes anunciado el 07 de junio del 2020 por las autoridades sanitarias [21]. Por otro lado, y en la mayoría del resto de regiones, se aprecia un incremento en esta tasa de asertividad, lo cual podría corresponder a un mayor esfuerzo de las autoridades en la detección y reporte de casos COVID-19. Estos resultados tuvieron un efecto importante en las estimaciones de incidencia y prevalencia que fueron realizadas posteriormente.

Por otro lado, también se encontró que debido a la baja cantidad de muertes y casos por COVID-19 durante los primeros meses de pandemia para algunas regiones, el modelo

de inferencia bayesiana y las estimaciones de riesgo comienzan a arrojar resultados posterior incluso al mes de mayo, lo cual dificultó la elección de un intervalo de tiempo adecuado que considerara la totalidad de las regiones para el escenario de medidas iniciales. Esta fue una de las limitaciones que se encontraron durante el desarrollo de esta investigación.

Los resultados obtenidos respecto a la movilidad interregional a partir de datos telefónicos permitieron identificar que la mayor cantidad de viajes interregionales lo concentran generalmente regiones limítrofes, a excepción de la Región Metropolitana que presenta una alta movilidad incluso con regiones alejadas al sur y norte del país. Sin embargo, es relevante considerar como limitante el método de conteo de viajes detallado en el gráfico 1, dado que en lugar de considerar un viaje único por usuario y por día, se contarían todas las demás transiciones entre regiones en el caso que existiesen, para cada usuario. Adicionalmente, se pudo comprobar que las restricciones iniciales de movilidad impuestas por las autoridades sanitarias se tradujeron en una disminución importante de los viajes entre las regiones mientras que el endurecimiento de estas con cuarentenas totales, estudiado como el escenario II, provocaron una disminución adicional aunque más moderada.

Las estimaciones correspondientes al indicador de riesgo y número reproductivo básico R_t permitieron caracterizar el efecto de las prohibiciones de viajes interregionales. Se verificó que durante los dos escenarios estudiados, una movilidad similar a las semanas pre-pandemia se hubiese traducido en el aumento del riesgo para la mayoría de las regiones, y por lo tanto la variación de estas en la clasificación sugerida por [6] resultando en un alto número de regiones en donde el impacto de las restricciones era sustancial. Tomando en cuenta estos resultados, se justificaría el establecimiento tanto de las primeras medidas de restricción como la cuarentena total para el controlar la propagación del COVID-19 en Chile.

Una de las posibilidades para desarrollar investigaciones futuras, y relacionada a una eventual comprobación de resultados, es la referida a la comparación de los valores obtenidos de asertividad de casos con publicaciones dedicadas al cálculo de seroprevalencia del país. Aunque, hasta la fecha se carece de publicaciones oficiales durante el año 2020 para las diferentes regiones. Este tipo de estudios permitiría la comparación de resultados obtenidos en el proceso gaussiano aplicado en la estimación de casos sintomáticos con una fuente externa. Recientemente, tanto la Universidad del Desarrollo como la Universidad de Chile comenzaron a ofrecer resultados preliminares de investigaciones de seroprevalencia enfocados en la Región Metropolitana con muestras tomadas durante los últimos meses del año 2020. Sin embargo, a la fecha aún no se tiene los resultados finales de ambas investigaciones.

La metodología utilizada para determinar la aplicación de las medidas de restricción interregionales fue basada en el efecto de los casos importados a las regiones destino respecto a su incidencia local, por lo que dichas medidas sólo abordarían restringir los viajes entrantes a las regiones, de modo que su situación epidemiológica no empeore. Es por ello que fue necesario complementar con novedosas visualizaciones que permitieron visualizar la magnitud de los casos importados y así verificar el rol de la Región Metropolitana como principal exportador de casos en cantidad. Dado este alcance, se propone como investigación futura el estudio del efecto de los casos importados desde las regiones origen sobre la incidencia local de las regiones destino, de esta forma, se podría determinar la aplicación de restricciones de movilidad respecto a los viajes salientes de las regiones origen que aporten significativamente a la situación epidemiológica de las regiones destino.

Bibliografía

1. WHO. WHO Director-General's opening remarks at the media briefing on COVID-19. March 11, 2020. <https://www.who.int/dg/speeches/detail/who-director-general-s-opening-remarks-at-the-media-briefing-on-covid-19---11-march-2020> (accessed January 12, 2020).
2. Ferres L, Schifanella R, Perra N, Vilella S, Bravo L, Paolotti D, Ruffo G & Sacasa M. (2020) Measuring Levels of Activity in a Changing City. A Study Using Cellphone Data Streams. 11. http://datascience.udd.cl/covid_ids_tef_01.pdf (accessed January 14, 2020).
3. Deutsche Welle. COVID herd immunity will not happen in 2021, says WHO. January, 11, 2020. <https://www.dw.com/en/covid-herd-immunity-will-not-happen-in-2021-says-who/a-56197701>
4. OECD. *OECD Economic Outlook, Volume 2020 Issue 2*, OECD Publishing (2020) Paris, <https://doi.org/10.1787/39a88ab1-en>.
5. Pappalardo L, Cornacchia G, Navarro V, Bravo L, Ferres L (2020) A dataset to assess mobility changes in Chile following local quarantines. arXiv:201112162 [physics]
6. Russell TW, Wu JT, Clifford S, Edmunds WJ, Kucharski AJ, Jit M (2021) Effect of internationally imported cases on internal spread of COVID-19: a mathematical modelling study. *The Lancet Public Health* 6:e12–e20. [https://doi.org/10.1016/S2468-2667\(20\)30263-2](https://doi.org/10.1016/S2468-2667(20)30263-2)
7. WEB DISEMINACIÓN CENSO 2017. <http://resultados.censo2017.cl/>. (Accessed 28 May, 2021)
8. Biblioteca del Congreso Nacional | SIIT | Evolución de la Estructura Etarea en Chile. https://www.bcn.cl/siit/actualidad-territorial-19-5-2015/estructura_poblacion_edad (Accessed 25 May, 2021)

9. WHO. Coronavirus disease 2019 (COVID-19) Situation Report – 94. April, 2020. <https://www.who.int/docs/default-source/coronaviruse/situation-reports/20200423-sitrep-94-covid-19.pdf> (accessed May 1, 2020).
10. Oran DP, Topol EJ (2020) Prevalence of Asymptomatic SARS-CoV-2 Infection. *Ann Intern Med* 173:362–367. <https://doi.org/10.7326/M20-3012>
11. Lauer S, Grantz K, Bi Q, Jones FK, Zheng Q, Meredith HR, Azman AS, Reich NG & Lessler J (2020) The Incubation Period of Coronavirus Disease 2019 (COVID-19) From Publicly Reported Confirmed Cases: Estimation and Application. *Annals of Internal Medicine*. <https://doi.org/10.7326/M20-0504>
12. A Systematic Review of the Incubation Period of SARS-CoV-2: The Effects of Age, Biological Sex, and Location on Incubation Period | medRxiv. <https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2020.12.23.20248790v1.full>. Accessed 25 May 2021
13. De Oliveira ACS, Morita LHM, da Silva EB, Zardo LAR, Fontes CJF & Granzotto DCT (2020) Bayesian modeling of COVID-19 cases with a correction to account for under-reported cases. *Infectious Disease Modelling* 5:699–713. <https://doi.org/10.1016/j.idm.2020.09.005>
14. Russell TW, Golding N, Hellewell J, Abbott S, Wright L, Pearson CAB, van Zandvoort K, Jarvis CI, Gibbs H, Liu, Y, Eggo RM, Edmunds WJ & Kucharski AJ (2020) Reconstructing the early global dynamics of under-ascertained COVID-19 cases and infections. *BMC Medicine* 18:332. <https://doi.org/10.1186/s12916-020-01790-9>
15. Verity R, Okell LC, Dorigatti I, Winskill P & Whittaker C (2020) Estimates of the severity of coronavirus disease 2019: a model-based analysis. *The Lancet Infectious Diseases* 20:669–677. [https://doi.org/10.1016/S1473-3099\(20\)30243-7](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(20)30243-7)
16. Linton NM, Kobayashi T, Yang Y, Hayashi K & Akhmetzhanov A (2020) Incubation Period and Other Epidemiological Characteristics of 2019 Novel Coronavirus Infections with Right Truncation: A Statistical Analysis of Publicly Available Case Data. *J Clin Med* 9:. <https://doi.org/10.3390/jcm9020538>

17. Chinazzi M, Davis JT, Ajelli M, Gioannini C, Litvinova M, Merler S, Pastore y Piontti A, Mu K, Rossi L, Sun K, Viboud C, Xiong X, Yu H, Halloran ME, Longini IM, & Vespignani A et al (2020) The effect of travel restrictions on the spread of the 2019 novel coronavirus (COVID-19) outbreak. *Science* 368:395–400.
<https://doi.org/10.1126/science.aba9757>
18. Gozzi N, Tizzoni M, Chinazzi M, Ferres L, Vespignani A & Perra, N (2021) Estimating the effect of social inequalities on the mitigation of COVID-19 across communities in Santiago de Chile. *Nat Commun* 12:2429.
<https://doi.org/10.1038/s41467-021-22601-6>
19. Lai S, Ruktanonchai NW, Carioli A, Ruktanonchai CW, Floyd JR, Prosper O, Zhang C, Du X, Yang W, & Tatem AJ et al (2021) Assessing the Effect of Global Travel and Contact Restrictions on Mitigating the COVID-19 Pandemic. *Engineering*.
<https://doi.org/10.1016/j.eng.2021.03.017>
20. Graells-Garrido E, Caro D, Parra D (2018) Inferring modes of transportation using mobile phone data. *EPJ Data Sci* 7:49. <https://doi.org/10.1140/epjds/s13688-018-0177-1>
21. Pauta. Cuáles son los nuevos conceptos de casos activos y fallecidos del Minsal. In: pauta. <https://www.pauta.cl/nacional/nuevos-conceptos-y-metodologia-conteo-casos-fallecidos-minsal-covid-19>. (Accessed 28 May, 2021)
22. Coronavirus en Chile pasa a fase 4 y Presidente anuncia cierre de fronteras. In: Ministerio de Salud – Gobierno de Chile. <https://www.minsal.cl/coronavirus-en-chile-pasa-a-fase-4-y-presidente-anuncia-cierre-de-fronteras/>. (Accessed 25 May, 2021)
23. Du Z, Xu X, Wu Y, Wang L, Cowling BJ & Meyers LA (2020) COVID-19 serial interval estimates based on confirmed cases in public reports from 86 Chinese cities. *Infectious Diseases (except HIV/AIDS)*
24. Cori A, Ferguson NM, Fraser C, Cauchemez S (2013) A New Framework and Software to Estimate Time-Varying Reproduction Numbers During Epidemics. *American Journal of Epidemiology* 178:1505–1512. <https://doi.org/10.1093/aje/kwt133>