



“Efectos de la contaminación atmosférica durante la gestación en la historia de salud de los niños y niñas en el Gran Santiago”

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE

Magíster en Análisis Económico

Alumno: Cecilia J. Correa Meneghello

Profesor Guía: Damian Clarke

Santiago, marzo de 2023

Efectos de la contaminación atmosférica durante la gestación en la historia de salud de los niños y niñas en el Gran Santiago *

Cecilia Correa Meneghello**

marzo de 2023

Abstract

La presente investigación busca estimar los efectos de la contaminación ambiental durante la gestación en la historia de salud de los niños durante su infancia, desde su nacimiento hasta los 10 años. Esto, para aportar a la literatura, que en general busca efectos de inmediato plazo, o efectos de la acumulación de contaminación en la salud de adultos, como efectos de largo plazo. Debido a que la contaminación a la que el feto se vio expuesto no es aleatoria, se utiliza una metodología de efectos fijos por madre, comparando entre hermanos y considerando la comuna en la que nació, junto con tendencias temporales. Se estiman los efectos de los niveles de Monóxido de Carbono (CO) y Ozono (O3) en cada trimestre de gestación en su salud al nacer: peso, talla y semanas de gestación, y en el hecho de haber estado hospitalizados a los 1, 5 y 10 años por una enfermedad cardiorrespiratoria o por cualquier enfermedad, junto con el número de días hospitalizados. Los efectos que se encuentran en la salud al nacer son pequeños y no son robustos a la inclusión de controles. Luego, en la salud a los 1, 5 y 10 años, los efectos de la contaminación durante la gestación se disipan: no se observa efectos significativos en la salud de los niños a medida que éstos van creciendo.

* Agradezco a quienes me han apoyado en este proceso, en primer lugar a mis abuelas, mi madre y a las mujeres que me acompañan. También a mi señor padre. A mis amiguísimos y amiguísimas, en especial a Benjamin, Alfredo y Camila, que me contaron cosas lindas cuando la tesis no se veía tan linda. Y por supuesto, a mi profesor guía y a todos los profesores que he tenido, tantas gracias por el conocimiento compartido.

** ccorream@fen.uchile.cl

1. Introducción

Existe una clara relación entre contaminación y salud: nacer y vivir en ambientes con una mayor contaminación atmosférica disminuye la calidad de vida en varios aspectos. La literatura se enfoca fuertemente en el impacto en la salud de las personas (Currie and Walker [2011], Knittel et al. [2016], entre otros), pero también existen investigaciones que observan el impacto de la contaminación en la participación en el mercado laboral y en los ingresos (Isen et al. [2014]).

Esta investigación busca calcular en profundidad el efecto que tiene la contaminación ambiental durante la gestación en la salud de los niños y niñas. Para ello, calcula el nivel de contaminación promedio al que estuvo expuesta la progenitora durante los tres trimestres de embarazo y se construye una historia del efecto de la contaminación durante la gestación en la salud de los niños hasta los 10 años. En primer lugar, se estima el efecto en características de salud al nacer de los niños: peso, haber tenido bajo peso al nacer ($< 2,5\text{kg}$), talla y número de semanas de gestación. En segundo lugar, en la salud de los niños al cumplir 1 año: se observa si ha estado hospitalizado por alguna enfermedad asociada al sistema cardiorespiratorio y por cualquier enfermedad y luego, se ve el número de días que ha estado hospitalizado por cualquier enfermedad y por una enfermedad cardiorespiratoria. En tercer lugar, se calculan las mismas variables hospitalarias para niños que hayan cumplido 5 años, y en cuarto lugar, se calculan las variables hospitalarias para niños que hayan cumplido 10 años.

Para encontrar el efecto de la contaminación durante la gestación en la salud de los niños se utilizan como variables proxy de contaminación ambiental los niveles de Monóxido de Carbono (CO) y de Ozono (O₃) en algunas comunas del Gran Santiago. La literatura en cambio se enfoca en estudiar efectos en la salud de corto y mediano plazo: contemplando los efectos en la salud al nacer e indicadores de salud a los 1, 5 y 10 años. Así, se aporta a la literatura, que se enfoca principalmente en los efectos de vivir en ambientes contaminados por largos periodos (Gong et al. [2020], Wang et al. [2019], entre otros), o en efectos inmediatos de experimentar episodios *peaks* de estos contaminantes (Deryugina et al. [2019], Ward [2015] y Dardati et al. [2021], entre otros).

La hipótesis de esta investigación es que los efectos de la contaminación durante los tres trimestres de gestación tienen un efecto negativo en las características del niño al nacer, pero que estos efectos se disipan a medida que los niños crecen debido a que se ven expuestos a más contaminantes y a distintos niveles de inversión familiar en su salud, que generan cambios en su salud al crecer.

Los datos a utilizar en esta investigación provienen (i) del Departamento de Estudios e Información de Salud (DEIS [2021]) del Ministerio de Salud, que publica anualmente todos los nacimientos y egresos hospitalarios. Estas dos bases de datos se pueden unir a partir de una variable indicadora (id) de cada individuo, lo que permite hacer un seguimiento de la salud de una persona desde de su nacimiento, y utilizar como variable proxy de su salud las hospitalizaciones observadas y sus causas. Por otra parte, los datos entregados por (ii) el

Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA [2020]) del Ministerio del Medio Ambiente, se utilizan para observar los niveles de concentración de las partículas contaminantes Monóxido de Carbono (CO) y Ozono (O3), además de la temperatura, humedad relativa y velocidad del viento, variables que afectan las concentraciones de las partículas contaminantes en el nivel del suelo. El SINCA obtiene la información meteorológica a través de estaciones de monitoreo que se encuentran en algunas de las comunas del Gran Santiago. Esta investigación se centrará en las comunas de El Bosque, Independencia, La Florida, Las Condes, Pudahuel, La Florida, y Santiago Centro, que publican información de calidad del aire diarias y características climáticas cada hora desde 2004.

Las familias deciden dónde vivir y ello determina los niveles de contaminación a los cuales la madre estará expuesta durante la gestación. La decisión del lugar de residencia está determinada por diversas limitaciones, restricciones y preferencias de la familia, y este lugar determina en gran medida la contaminación a la que los individuos se ven expuestos. Es por esto, que la aproximación empírica para medir los efectos de los niveles de concentración de partículas contaminantes durante la gestación en la salud de los niños y niñas, es de una comparación entre hermanos. Esto permite además controlar por características intrínsecas de la familia, que no son observables en los datos, como el tiempo destinado al aire libre que tienen los y las niñas, o las acciones que toma la madre frente a la contaminación durante la gestación de sus hijos/as. Así, a partir de la variable indicadora de madre que tiene la base de datos de nacimientos del DEIS, esta investigación es capaz de unir a hermanos y utilizar una metodología de efectos fijos de familia.

Los resultados de esta investigación no son robustos al respecto de un efecto negativo en la salud de los niños y niñas. En el peso al nacer, los efectos de los niveles de Monóxido de Carbono (CO) y de Ozono (O3) trimestrales son pequeños y no son robustos a la inclusión de controles. En el resto de las variables de salud al nacer (talla, semanas de gestación y tener bajo peso al nacer), los resultados son prácticamente nulos y/o contraintuitivos. A medida que los niños crecen, los efectos de las partículas contaminantes durante la gestación se disipan: no se encuentran efectos significativos de la contaminación durante la gestación tanto en hospitalizaciones relacionadas a enfermedades del sistema cardiorrespiratorio como en hospitalizaciones en general a los 1, 5 y 10 años.

A pesar de que los resultados encontrados no son robustos, es necesario seguir investigando sobre los efectos de la contaminación en costos para el sistema de salud, en efectos de capital humano de los niños y en comportamientos evitativos de las familias. Esto, pues deben ser considerados dentro de los análisis de costos y beneficios económicos y sociales de los vehículos y las industrias. Los cuales en general benefician económicamente a la población pero que también aumentan los niveles de contaminación a los cuales la población se ve expuesta.

Los resultados de esta investigación, indican que la polución afecta marginal o de manera nula en las características de salud de los niños y niñas al nacer. Por otra parte, los efectos van disminuyendo su significancia

con el tiempo: las hospitalizaciones al primer año ya no se ven afectadas, y menos son las hospitalizaciones a los 5 y 10 años. Parte de estos resultados pueden deberse a la inversión en salud de las familias, el número de consultas médicas o distintos tratamientos médicos logran evitar que personas con distintas enfermedades lleguen a estar hospitalizados/as. Las variables que se utilizan en esta investigación como proxy de salud al ir creciendo son variables muy difíciles de afectar, y esta es una de las hipótesis de por qué la contaminación durante la gestación no tiene efectos observables en la salud al ir creciendo.

Por otra parte, esta investigación no toma en cuenta los efectos de la contaminación en salud de largo plazo. Es decir, luego de estar expuestos durante años a materiales contaminantes del aire, las personas pueden comenzar a desarrollar enfermedades. Así, se recomienda también ampliar el análisis teniendo como hipótesis que haya una enfermedad “latente” en los niños que estuvieron más expuestos a partículas contaminantes durante su gestación (Nilsson [2009], Isen et al. [2014] y Sanders [2012], entre otros).

En lo que queda de este documento, primero se revisa la literatura relevante en la sección 2, luego en la sección 3 se comenta del contexto en el cual se realiza esta investigación. La sección 4 explica la metodología a utilizar. La sección 5 describe los datos y muestra estadística descriptiva. La sección 6 muestra los resultados de la investigación, tanto en la salud de los niños al nacer como a los 1, 5 y 10 años. Por último, la sección 7 resume, concluye y discute acerca de esta investigación.

2. Revisión de Literatura

Existe amplia investigación sobre los efectos de nacer o vivir en ambientes contaminados sobre distintos outcomes, principalmente en la salud de corto y largo plazo, y en la acumulación de capital humano y productividad de los individuos. A continuación, se realizará una breve revisión de investigaciones sobre estos efectos.

2.1. Efectos de nacer y vivir en ambientes contaminados en la salud

La evidencia en países desarrollados concluye que la exposición a contaminación atmosférica durante la gestación genera una mayor tasa de mortalidad infantil, menor peso al nacer y una caída en las semanas de gestación, además de mayores tasas de hospitalizaciones por infecciones respiratorias o asma en niños pequeños (Currie and Walker [2011], entre otros). Lelieveld et al. [2015] explican que la concentración de Material Particulado respirable (PM2.5) en el aire genera un aumento en la mortalidad prematura en todo el mundo, especialmente en países de Asia. Encuentran que los aumentos de contaminación que se observan en el tiempo generarían la duplicación de la tasa de mortalidad prematura para 2050. Por otra parte, Clay et al. [2021] encuentran que altos niveles de PM2.5 generan un aumento en la mortalidad prematura en Estados Unidos.

Los efectos de la contaminación ambiental en la salud de infantes no son necesariamente iguales en-

tre países desarrollados y en vías de desarrollo. No solo porque los indicadores de salud en países en vías de desarrollo son más bajos, sino porque también tienen mayores niveles de partículas contaminantes: La recomendación de OMS es de un máximo de $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ PM10, el promedio de contaminación de la OECD en 2019 era de $13,9\mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que el de Chile era de $23,7\mu\text{g}/\text{m}^3$ (OCDE [2019]). Así, el porcentaje de población de Chile expuesto a un nivel mayor que el recomendado por la OMS es del 98,6%.

Las investigaciones de Currie and Walker [2011] y Aparicio et al. [2019] utilizan una gran muestra de niños y niñas que estuvieron expuestos a distintos niveles de contaminación durante la gestación. Incluyen efectos fijos de familia para corregir por decisiones del grupo familiar y las condiciones genéticas a las que se vieron expuestos los hermanos. El paper de Currie and Walker [2011] investiga los niveles de Monóxido de Carbono (CO) y Material Particulado respirable (PM10) de 1990 en California, es decir, niveles que ya habían empezado a ser controlados con el objetivo de que disminuyeran. Esto les permite encontrar efectos de reducciones marginales de los niveles de las partículas contaminantes, comenzando desde niveles más bajos de contaminación que otras investigaciones. La investigación solo encuentra efectos en la mortalidad prematura, mientras que no encuentran efectos en la probabilidad de muerte fetal, el bajo peso al nacer y el número de semanas de gestación. El hecho de que un nivel inicial de contaminación menor determine resultados distintos llama a investigar sobre los efectos no lineales de la contaminación atmosférica en la salud.

La diferencia de salud y niveles de contaminación entre países es relevante porque la literatura avala que los efectos de la contaminación ambiental en la salud no son lineales (Arceo-Gomez et al. [2015], Nilsson [2009], Currie and Walker [2011]). Esto significa que el efecto del cambio en los niveles de partículas contaminantes en el aire no siempre tendrá el mismo impacto, sino que depende también de su nivel inicial: cuando el nivel promedio de CO disminuye desde 0,7 a 0,6 tendría un efecto distinto en la salud de la población que si disminuye desde 1,0 a 0,9. A pesar de que la disminución en ambas situaciones es el mismo (0,1), la diferencia en la exposición inicial de la población entre los dos casos genera que el impacto en su salud sea distinto. Así, las políticas de disminución de contaminación ambiental deben ser diferentes entre países, por los distintos niveles de contaminación y concentración de distintas partículas contaminantes, pero también por los distintos indicadores de salud de la población. Al respecto, Arceo-Gomez et al. [2015] muestra que la concentración de CO tiene mayores efectos en la mortalidad infantil de México que en Estados Unidos, mientras que la concentración de PM10 tendría efectos similares en ambos países.

Hay un menor número de investigaciones que tratan de encontrar efectos de largo plazo de la contaminación atmosférica durante la gestación, en especial debido a la dificultad de unir datos de contaminación durante la gestación con outcomes en adultos. Las investigaciones que buscan efectos de largo plazo en general hacen estudio de cohortes, donde se evalúa el año de nacimiento de cada persona con los resultados promedio de la cohorte en salud y productividad en su adultez. Es decir, se comparan cohortes que fueron afectadas por una alta contaminación medioambiental con las cohortes adyacentes. Esto es el caso de Almond et al. [2009] y Black et al. [2013], que investigan al respecto de los efectos de largo plazo de la exposición a contaminación

radioactiva durante la gestación en Chernobyl. Los resultados de [Almond et al. \[2009\]](#) muestran que la cohorte que nace justo después del accidente de Chernobyl, lo que significa que el accidente ocurrió en su periodo de gestación, tienen resultados menores en exámenes escolares que las cohortes colindantes. Este resultado es más fuerte para las cohortes que estuvieron expuestas a la radiación durante las semanas 8 a 25 de gestación. Así, no solo importa el nivel de contaminación durante la gestación en general, sino que el efecto depende del nivel de desarrollo del feto, medido como la semana de gestación. Su investigación es robusta a utilizar una muestra restringida de hermanos para realizar un modelo de Diferencias en Diferencias por familia, así observan únicamente a hermanos y hermanas del mismo sexo, calculando solo el efecto dentro de la familia y no entre familias.

[Foster et al. \[2009\]](#) explican la importancia de los mecanismos que regulan y mejoran la calidad del aire, y que limitan además los efectos adversos en el crecimiento económico. Los autores investigan el impacto de la calidad del aire en la mortalidad infantil en México, Una innovación es que construyen los datos de niveles de contaminación de distintas partículas en base a imágenes satelitales. Explican que la fuente principal de datos en otras investigación sobre la calidad del aire son las estaciones meteorológicas terrestres, pero que en general éstas están situados en áreas metropolitanas y que no necesariamente representan los niveles de contaminación a los que se ve expuesta la población de tal área.

2.2. Efectos en la salud de la contaminación durante la gestación diferenciado por sexo

[Aparicio et al. \[2019\]](#) discuten acerca del impacto de la contaminación en el aire durante la gestación, en infantes de América Latina. Muestran el efecto negativo de la contaminación en el peso al nacer e investigan si la contaminación medioambiental asociado al desarrollo económico es más dañina en fetos del sexo masculino que en fetos del sexo femenino. Su estrategia de identificación explota la variación de contaminación entre municipalidades y fechas. Consideran únicamente a aquellos niños y niñas nacidos en la misma ubicación donde vivía su madre antes de la concepción. Los autores promedian el nivel de contaminación de los nueve meses previos al nacimiento de cada niño/a y discuten su relevancia en el peso al nacer, encontrando que efectivamente la polución afecta más a fetos del sexo masculino.

El impacto diferenciado en fetos según su sexo probablemente proviene de una menor capacidad respiratoria en fetos del sexo masculino, debido a mayor resistencia en las vías respiratorias y menor desarrollo pulmonar ([Clougherty \[2011\]](#)). [Sanders and Stoecker \[2015\]](#) revisan los ratios del sexo de recién nacidos para estimar el efecto de la contaminación ambiental en la tasa de abortos espontáneos dependiendo del sexo. Muestran que los Clean Air Act Amendments (CAAA) de 1970 de Estados Unidos, tuvieron un efecto positivo en la tasa de recién nacidos del sexo masculino por sobre el femenino, concluyendo así que los fetos del sexo masculino son más vulnerables a situaciones de estrés materno, tales como la contaminación ambiental.

2.3. Efecto de vivir en ambientes contaminados en el desarrollo cognitivo y la productividad

En Chile, [Bharadwaj et al. \[2017\]](#) encuentran en Chile una fuerte relación negativa de la exposición fetal a Monóxido de Carbono (CO) y otros contaminantes en el desarrollo de habilidades de matemáticas y lenguaje en 4° básico. Calculan que la reducción de CO de un 50 % que ocurrió en Santiago entre los años 1990 y 2000, aumentó los ingresos de por vida de cada cohorte debido a su mayor desarrollo cognitivo. En su investigación utilizan el promedio del nivel de CO en cada trimestre de gestación como variable explicativa, controlando por variables del clima y alertas de calidad de aire, que podrían explicar cambios de comportamiento de corto plazo. Para poder controlar por el ordenamiento dentro de la ciudad entre hogares con distintas características, utilizan una comparación por hermanos.

[Bharadwaj et al. \[2013\]](#) encuentran una fuerte relación de las intervenciones de salud en niños recién nacidos en la tasa de mortalidad infantil y sus resultados en exámenes académicos. Utilizan la estrategia de regresión discontinua con datos de Chile y Noruega, debido a que en ambos países, existe una fuerte intervención en la salud de los recién nacidos con un peso bajo los 1500 gr. La investigación muestra cómo la salud al nacer y los cuidados neonatales afectan en el desempeño académico futuro de los niños, lo que sugiere fuertemente que también afecta a la productividad futura.

En general, las intervenciones en niños a edades tempranas tienen un mayor impacto que aquellas que se realizan a mayor edad. [Cunha and Heckman \[2008\]](#) observan cómo la inversión de los padres a edades tempranas afectan el desarrollo cognitivo y no cognitivo de los niños y niñas, argumentando que las políticas públicas se deben enfocar en niños a edades tempranas, invirtiendo en su desarrollo emocional, cognitivo y social en sus primeros años de vida.

Otros autores y autoras que investigan al respecto del efecto de largo plazo de la contaminación durante los primeros años de vida de cada cohorte son [Nilsson \[2009\]](#), [Isen et al. \[2014\]](#) y [Sanders \[2012\]](#). [Nilsson \[2009\]](#) observa en Suecia la reducción de plomo en la sangre de los niños debido a regulaciones sobre el nivel de plomo en la gasolina. Encuentra efectos positivos de esta reducción de plomo en outcomes de rendimiento académico, habilidades cognitivas y desempeño laboral de adultos jóvenes. Encuentra además que los efectos no son lineales pues existiría un umbral bajo el cual mayores reducciones no tendrían efecto. Por otra parte, [Isen et al. \[2014\]](#), muestra los efectos de la contaminación por gasolina y los Clean Air Act Amendments (CAAA) de 1970, en Estados Unidos. Concluye que hay una relación significativa entre el nivel de contaminación del aire y outcomes laborales: una mayor contaminación en el año del nacimiento se relaciona a una menor participación laboral y un menor ingreso por trabajo a los 30 años. Por último, [Sanders \[2012\]](#) muestra el efecto de la reducción de contaminación industrial por la recesión de 1981 - 1983 en Estados Unidos. En las cohortes de 1979 a 1985, encuentra que la reducción de contaminación de 1 desviación estándar generaría un aumento de

1,87 % desviaciones estándar en exámenes de High School¹.

Currie and Hyson [1999] estudian los efectos de largo plazo en la salud autorreportada y outcomes laborales de haber tenido un bajo peso al nacer. Su población de estudio es un grupo de personas que nacieron en Gran Bretaña en una semana específica de 1958. Ellos observan a esta cohorte hasta la edad de 33 años. Así, tienen una base con datos de panel muy completa. Al investigar sobre los efectos de largo plazo de tener un bajo peso al nacer encuentran que el tener bajo peso al nacer afectaría de manera negativa en su estado de salud auto-reportado y en sus logros educacionales y outcomes laborales. Un resultado interesante que encuentran es que, a pesar de que no se observa un efecto importante de tener bajo peso al nacer en la salud en el largo plazo, mujeres de una alta situación socioeconómica que tuvieron un bajo peso al nacer reportarían una peor situación de salud que mujeres que tuvieron bajo peso al nacer pero que no tienen una alta situación económica.

2.4. Ordenamiento de la ciudad a partir de la contaminación

La investigación de Chay and Greenstone [2005] muestran cómo una regulación pseudo-aleatoria en los niveles de contaminación entre distintos condados de Estados Unidos², afecta en el valor de las propiedades. La investigación encuentra dos efectos causales a partir de una metodología de Variables Instrumentales: (i) el impacto de la regulación efectivamente generó mejoras de la calidad del aire, y (ii) en los condados regulados el valor de las propiedades aumentó. Esto implica que efectivamente existe un ordenamiento territorial a partir de los ingresos de las personas, y que este ordenamiento considera la contaminación del barrio. Junto a esto, son muchas otras las características, preferencias y restricciones familiares e individuales que afectan el ordenamiento dentro de la ciudad y entre ciudades.

2.5. Metodología de medición de partículas contaminantes y de su impacto

Lin [2010] analiza el movimiento de partículas contaminantes en la atmósfera, específicamente de Dióxidos de Nitrógeno. La autora encuentra resultados que avalan la hipótesis de que emisiones desde hasta 1.000km de distancia lineal, desde diversas direcciones, pueden tener efectos en la calidad del aire. Encuentra también que la dirección no es constante en el tiempo, ni lo es el signo del efecto (entendiendo que éste puede ser positivo o negativo en la calidad del aire). Se explica que puede existir una externalidad positiva en el movimiento de Dióxidos de Nitrógeno (NOx) debido a una falta de monotonicidad en la producción de Ozono (O3).

Las series de tiempo en cada territorio muestran los niveles acumulados de contaminación del aire en el tiempo. A pesar de que los niveles diarios de contaminación sean bajos, su acumulación se asocia a alzas en las tasas de mortalidad en variadas ciudades de Estados Unidos y Europa (Lipfert and Wyzga [1993], Pope et al. [1995], Schwartz [1993]). Comentan la necesidad de utilizar abundantes covariables para evitar problemas de variables omitidas relevantes, tales como efectos de edad o el clima. Además, es necesario considerar la

¹Enseñanza secundaria.

²Similar a lo que es una comuna en Chile.

posibilidad de que haya error de medida de exposición a la contaminación, lo que llevaría a sesgo en la estimación de su efecto en la salud.

Los estudios que investigan los efectos de la contaminación del aire en la salud generalmente utilizan datos recopilados para otros fines. Esto puede limitar su capacidad para obtener resultados específicos, pues la naturaleza y estructura de datos no son específicas para estas investigaciones. Los efectos crónicos o a largo plazo son el resultado de una exposición prolongada a partículas contaminantes a lo largo del tiempo, por lo que se necesitan estudios que utilicen funciones acumulativas complejas para evaluar la exposición crónica a la contaminación a lo largo de la vida. Por otro lado, los efectos inmediatos o a corto plazo responden a las variaciones temporales en la exposición a la contaminación del aire (Dominici et al. [2003]).

Una pregunta relevante en el diseño de las investigaciones es si existe suficiente variación en la exposición a contaminación del aire. La variación puede ser temporal y/o espacial. En el caso de que se considere la exposición personal a la contaminación ambiental, la distribución espacial se amplía para considerar comportamientos personales y así, microambientes personales. Debido a que la medición de contaminación aérea proviene de monitores centrales, la clasificación errónea del nivel de exposición es una gran limitación de este tipo de estudios. Además de esto, al maximizar la variabilidad de áreas de la investigación, se corre el riesgo de tener efectos por características específicas de las áreas más que por la variación de contaminación entre los territorios (Dominici et al. [2003]). El sesgo por variables omitidas relevantes, es decir, variables que afectan tanto la salud como la contaminación, nunca se puede solucionar con data observacional. Así, en la elección del modelo el sesgo podrá dominar por sobre la eficiencia.

Los “distributed lag models” y “time scale models” consideran más de un *lag* en la estimación y se utilizan para estimar el efecto en salud de la contaminación del aire acumulada y con una más larga escala temporal. Los “time scale models” se utilizan para estimar la relación entre un outcome de salud en un día y la contaminación del aire varios días antes. En general, las escalas temporales de interés son variaciones de corto plazo: 1 a 4 días de anticipación; y variaciones de mediano plazo: 1 a 2 meses. Sobre los dos meses de anterioridad, es probable que cualquier efecto responda más a la estacionalidad que a los niveles de contaminación. (Zanobetti et al. [2000])

En el caso de las covariables relevantes para calcular de manera correcta el efecto entre personas, en caso de calcular efectos de variaciones de corto plazo se deben utilizar controles como el día de la semana, mientras que las variables que son constantes a lo largo del tiempo para cada individuo, pueden ser incorporadas para aumentar la eficiencia del modelo.

En modelos lineales se asume una varianza constante en el tiempo, además de asumir que los outcomes en distintos días son independientes. Así, el problema de “attrition”, o de pérdida de observaciones al pasar el tiempo, podría generar un sesgo ya que no se consideran los patrones de pérdida de datos. Esto significa que la

pérdida de observaciones a través del tiempo no es necesariamente aleatoria, y en el caso de que esta pérdida de datos dependa de las variables explicativas, la estimación estará sujeta a sesgo por variable omitida relevante ([Korn and Whittemore \[1979\]](#), [Wakefield and Salway \[2001\]](#)).

Es importante notificar la incertidumbre que se genera al momento de elegir el modelo a utilizar. Es común elegir el modelo en base a los datos, los lags y el nivel de suavización de las curvas. Pero decidir el modelo en base al ajuste de los datos lleva a tener una mayor probabilidad de encontrar alguna asociación significativa. Frente a esto, el “Bayesian Model Averaging” (BMA) ha surgido como una forma de realizar inferencia que considere la incertidumbre de seleccionar un modelo por sobre otro, lo que se realiza a partir de la combinación de la inferencia de varios modelos con los mismos datos ([Draper \[1995\]](#), [Hoeting et al. \[1999\]](#)).

2.6. Compensación económica de sectores contaminados

[Moretti and Neidell \[2011\]](#) exponen la importancia de medir de manera correcta la exposición a contaminación ambiental para poder compensar a los individuos que viven en zonas contaminadas a través de inversiones en el sector de la salud y lograr, de alguna manera, mantener o mejorar su salud a pesar de la exposición a contaminación. Frente a esto, personas con mayores problemas de salud en general tienen comportamientos evasivos frente a altos niveles de contaminación. Así, la estimación se enfrenta a un error de medición si observa el efecto del nivel de calidad del aire en la salud de las personas, sin controlar por aquellos individuos que tendrán comportamientos específicos para evitar el daño de la contaminación del aire en su salud. Por ello, los autores estiman el efecto de la contaminación del aire en la salud utilizando como variable instrumental el trabajo portuario de cada día, variable explicativa del nivel de contaminación diaria, pero que no permitiría a las personas tomar medidas previas frente al nivel de contaminación de ese día.

3. Contexto de Santiago, Chile entre 2004 y 2018

Estimar efectos de la contaminación durante la gestación, en distintas características permite profundizar sobre las razones por las que la contaminación medioambiental durante los primeros años de vida tienen efectos en outcomes de desarrollo cognitivo, productividad y mercado laboral.

Debido a la disponibilidad de datos, esta investigación sigue a cohortes de 2004 a 2018 y observa la salud de los niños al ir creciendo.

En este periodo el cobre tuvo un alza sostenida en su precio, con un precio promedio de *USD*1,27 la libra en 2000, y *USD*3,74 en 2010, para luego disminuir a *USD*2,93 (Precio real a dólar del 2012, [Cochilco \[2020\]](#)).

Por otra parte, la crisis asiática tuvo sus últimas repercusiones durante los primeros años de los 2000. Esta crisis puede haber afectado de manera indirecta a la salud de los niños: la variación de precios afecta

en la compra de alimentos y así en la nutrición. Por otra parte, los niveles de estrés de la madre pueden ser traspasados a los niños pequeños compartiendo hogar con personas en situación de estrés.

La población en estudio habita la ciudad de Santiago, la cual es una ciudad contaminada y la polución viene en gran parte de los vehículos motorizados y de industrias que se encuentran en las afueras de la ciudad (Bharadwaj et al. [2013]). en Santiago, el régimen de transporte público cambió al “Transantiago” (ahora llamado “Red”) en febrero de 2007. Esto significó un cambio de flota y de recorridos, el cambio buscaba aumentar la eficiencia del transporte público evitando la duplicidad de recorridos, entre otras cosas. Ahora, se está invirtiendo en buses eléctricos. Esto implica una disminución de la polución proveniente del transporte público.

Por último, el terremoto del 27 de febrero de 2010 se sintió fuertemente en Santiago, por lo que es necesario considerar que las madres gestando durante febrero de 2010 pueden haber pasado por altos niveles de estrés. Los niños y niñas nacidos antes del 2010 estuvieron expuestos a este desastre natural y/o a niveles altos de estrés.

Estos son solo algunas características del periodo que es necesario tener en consideración al evaluar los resultados.

4. Metodología de medición de impacto

La metodología de medición de impacto de esta investigación corresponde a una comparación entre hermanos, los cuales comparten características de su madre, pero estuvieron expuestos a niveles distintos de partículas contaminantes durante su gestación. La varianza de las partículas contaminantes durante sus tres trimestres de gestación proviene de las diferencias de niveles de las partículas durante la gestación de cada niño/a en distintas fechas y comunas.

4.1. Por qué no se utiliza una ecuación de MCO

Una aproximación econométrica de Mínimos Cuadrados Ordinarios presentaría claros problemas de endogeneidad: la estimación de los efectos de los niveles de las partículas contaminantes estaría sesgada, a pesar de incluir controles. La ecuación estimaría los efectos de los niveles de CO y O₃ durante los tres trimestres de gestación, controlando por las características medioambientales de velocidad del viento, temperatura máxima, humedad relativa y número de alertas ambientales.

La estimación estaría sesgada porque la exposición a CO y O₃ entre madres no es exógena: depende de las características de la madre y de su entorno. Además de que el ordenamiento de familias dentro de la ciudad no es aleatorio: depende de las restricciones familiares y de sus preferencias. Vivir en ambientes menos contaminados no es una opción disponible para todas las familias, pues depende fuertemente de restricciones como son el ingreso familiar, pero también, la decisión de vivir en cada comuna depende de preferencias tales

como seguridad, cercanía a espacios educativos para los niños y al lugar de trabajo de los adultos del hogar, entre otras cosas.

Otras variables no observables que afectarían en el sesgo de la estimación es el comportamiento de la madre frente a los niveles de contaminación, son (i) el comportamiento de la madre frente a la contaminación, y (ii) el movimiento de la madre dentro de la ciudad. El primero corresponde a preferencias específicas de la madre, y el segundo puede depender también de movimientos al lugar de trabajo, visitas a personas en otras comunas, entre muchas otras cosas que determinan el movimiento de cualquier persona dentro de la ciudad. Incluso, el tipo de transporte que utilizan las personas determina también los niveles de exposición que tendrá a las partículas contaminantes ambientales.

Así, el experimento óptimo para encontrar efectos de la contaminación durante la historia de salud de cada niño/a, sería asignar de manera aleatoria a cada madre distintos niveles de contaminación durante la gestación, controlando cualquier variable que pudiera afectar la exposición al nivel de contaminación recibe durante la gestación. Al asignar de manera aleatoria el nivel de contaminación, cualquier característica intrínseca de la madre no afectarían el outcome de interés pues el término de error en la ecuación no estaría correlacionado con ninguna variable no observable y así, sería exógeno a las variables de la ecuación.

Así, una estimación por Mínimos Cuadrados Ordinarios requeriría del supuesto de que todos los niños y niñas tienen las mismas características intrínsecas genéticas y el mismo comportamiento de las madres durante la gestación frente a los niveles de contaminación. Por otra parte, para estimar los efectos en la salud a medida que los niños crecen, se debe asumir que todos los niños tienen la misma inversión en salud, tales como controles médicos y preocupación de su nutrición, entre muchas otras características y decisiones familiares. En general los ingresos de la familia determinan también el acceso a salud preventiva que tiene el niño.

4.2. Metodología de Efectos Fijos por hermanos

Es por esto que se propone una metodología de comparación entre hermanos: ambos hermanos tendrían similares características genéticas, y se asume que la madre tuvo similares comportamientos durante la gestación de cada hermano/a que afectarían en la salud del feto, como son los comportamientos de evitación frente a las alertas ambientales. Además de asumir que los comportamientos en el hogar de los niños y niñas son similares a cada edad, a medida que los niños van creciendo. Entonces, la estrategia de identificación usada en esta investigación corresponde a una estimación de efectos fijos por hermanos, similar a [Bharadwaj et al. \[2017\]](#), que observa que los niveles de contaminación durante la gestación afecta en los resultados del SIMCE de 4° básico de los niños. Los hermanos, al nacer en fechas distintas³, se vieron expuestos a distintos niveles de contaminación durante su gestación, por lo que comparar los niveles de contaminación y su salud es una forma de observar el efecto diferenciado de la contaminación en la salud.

³Se excluyen de la muestra a hermanos gemelos y mellizos.

Es importante agregar variables de control a la estimación del efecto de la contaminación en la salud al nacer, uno de los controles es el sexo de los hermanos/as, tal como Aparicio et al. [2019] y Clougherty [2011] definen como necesario, debido que fetos del sexo femenino desarrollan antes su sistema cardiorrespiratorio. Las características climáticas trimestrales afectan tanto los niveles de concentración diaria de CO y O₃, como en las actividades que realiza la madre y por último, en su salud. Así, las características climáticas y las alertas ambientales afectan al nivel de exposición que tiene la madre a las partículas contaminantes. Además, estas variables pueden incentivarlas a protegerse de los niveles de contaminación, teniendo distintos comportamientos de evitación.

La ecuación a estimar para cada variable de salud al nacer es:

$$y_{i,j} = \alpha + \phi_j + \sum_{t=1}^3 \beta_t T_{t,i} + \sum_{t=1}^3 \gamma_t C_{t,i} + \theta Mujer_i + \varepsilon_{i,j} \quad (1)$$

Siendo

- y_i el outcome de interés del niño i nacido de la madre j , el cual es (i) peso, (ii) talla al nacer, (iii) una variable dicotómica que indica que el niño nació con bajo peso ($< 2,5\text{kg}$) y (iv) las semanas de gestación
- ϕ_j corresponde al efecto fijo de hermanos.
- T_t la media de contaminación de CO u O₃ en cada trimestre t que tuvo la madre durante la gestación del niño i . Esta es la variable explicativa, que determinaría el nivel de contaminación al que se vió expuesto el niño/a durante su gestación.
- C_t las características medioambientales promedio: temperatura máxima diaria, velocidad del viento promedio diaria y humedad relativa promedio diaria, todo calculado como media móvil en cada trimestre t en la que la progenitora estuvo gestando al niño i . También considera el número de alertas, pre emergencias y emergencias ambientales durante cada trimestre t de gestación del niño i .
- $Mujer_i$ corresponde a una variable dicotómica que muestra si el niño/a está asociado al sexo de mujer.
- $\varepsilon_{i,j}$ es el término de error estocástico no observado.

Junto a este modelo, se generan variaciones al agregar como control un efecto fijo de la edad de la madre, pues esta variable se relaciona con el peso y talla al nacer del niño/a: madres más jóvenes en general tienen hijos más pequeños. Además, un efecto fijo del año y mes de nacimiento, para controlar por tendencias temporales y un efecto fijo por la comuna en la cual la madre residía en el momento de dar a luz. Por último, se genera un efecto fijo de la interacción de las variables de fecha (año y mes de nacimiento) y la comuna de residencia de la madre también para incluir una tendencia específica que ocurra en la fecha y la comuna.

Para poder realizar la historia de salud del niño/a, se estima el efecto de los distintos niveles de contaminación durante la gestación en su salud a los 1, 5 y 10 años, también considerando un efecto fijo por madre. Las variables proxy de salud a las distintas edades son (i) si el niño/a ha estado hospitalizado o no y (ii) el número de días cama. Esto (a) para cualquier enfermedad y (b) para enfermedades relacionadas al sistema cardiorrespiratorio. La ecuación a estimar para calcular los efectos en si el niño/a ha estado hospitalizado y el número de días que ha estado hospitalizado es la misma ecuación de efectos fijos utilizada en la estimación de la salud al nacer: se calcula el efecto de los niveles promedio de CO y O₃ en cada trimestre de gestación en sus variables hospitalarias, controlando por el sexo del niño/a, las condiciones del tiempo, el número de alertas ambientales durante cada trimestre y considerando un efecto fijo por madre, y por año, mes y comuna de nacimiento.

4.3. Metodología de ordenamiento geográfico

En la investigación de [Bharadwaj et al. \[2013\]](#) se utiliza la estación meteorológica más cercana al lugar de residencia de la madre para calcular el nivel de contaminación al que estuvo expuesta. Debido a la sensibilidad de los datos de residencia exacta, en la presente investigación se utiliza únicamente la comuna de residencia para definir a qué estación meteorológica es asignada. Es por esto que no se utiliza la totalidad de niños nacidos en el Gran Santiago, sino únicamente aquellos cuya madre residía en alguna de las comunas que tienen una estación meteorológica. De esta manera, se disminuye el sesgo por error de medición en la variable independiente, es decir, se aproxima de manera más exacta el nivel de contaminación al que madre estuvo expuesta a partir de su comuna de residencia: Santiago, El bosque, Independencia, La Florida, Las Condes y Pudahuel. Esto requiere suponer que la movilidad de la madre dentro de la ciudad fue mínima y que el espacio donde más estuvo expuesta a partículas contaminantes fue su comuna de residencia.

5. Datos y Estadística Descriptiva

Los datos utilizados provienen principalmente de dos fuentes: El Ministerio de Salud y el Ministerio del Medio Ambiente. A continuación, se describe qué información entrega cada fuente y cómo se utiliza en esta investigación. Se utilizan únicamente datos del Gran Santiago debido a que esta ciudad corresponde a una cuenca, lo que significa que los vientos no logran disipar tan fácilmente las partículas contaminantes. Así, la medición de partículas contaminantes en cada estación meteorológica es más representativa del nivel de contaminantes de cada comuna que en ciudades que no estén rodeadas de cerros ([Lin \[2010\]](#)). Además de esto, por disponibilidad de datos, se utilizan únicamente datos de las comunas de Santiago, El bosque, Independencia, La Florida, Las Condes y Pudahuel (revisar subsección [5.2](#)).

5.1. Ministerio de Salud de Chile

El Departamento de Estadísticas e Información de Salud ([DEIS \[2021\]](#)) del Ministerio de Salud de Chile publica la información del nacimiento de todos los niños y niñas en Chile desde 1991 a 2018. Los datos de

nacimientos de los niños contiene variables de la fecha y lugar de nacimiento, características del niño/a al nacer, sexo, y características de ambos padres, tales como edad, comuna de residencia, nivel educacional y situación laboral. Además de esto, cada niño/a está identificado con una variable indicadora (id) y su madre también. Este id de la madre permite hacer un cruce entre niños nacidos de la misma madre, dato presente desde el año 2000.

Por otra parte, el [DEIS \[2021\]](#) entrega información de todos los egresos hospitalarios en Chile desde 2001 hasta 2020. Esta base de datos contiene el id del individuo, sus características en general, tales como la fecha de nacimiento, país de origen, comuna de residencia y previsión de salud, además de su procedencia (en el caso de que haya sido derivado desde otro servicio de salud), sus diagnósticos e intervenciones, su fecha de egreso y su condición de egreso⁴. Con esta base de datos, se construyen las variables de número de días que cada niño ha estado hospitalizado a los 1, 5 y 10 años, y una variable dicotómica que indica si el niño o niña ha estado hospitalizado por lo menos una vez a los 1, 5 y 10 años, por cualquier enfermedad o por alguna enfermedad relacionada al sistema cardio respiratorio.

Debido a que en esta investigación se utiliza la metodología de efectos fijos por hermanos, se restringe la muestra a aquellos individuos a los que se les puede hacer el link a través de la madre con sus hermanos y/o hermanas, y se excluyen de la muestra a mellizos y gemelos, pues éstos, al nacer en la misma fecha, se vieron expuestos a los mismos niveles de contaminación durante la gestación. Por disponibilidad de datos, se utilizan los datos de los niños nacidos desde 2004 hasta 2018 y se unen con sus condiciones hospitalarias.

La construcción de la base de datos de salud de los niños/as consideran características al nacer y su historia hospitalaria. Junto a esto, se realiza un link entre hermanos. En el caso de que el identificador (id) de un niño no esté presente en la base de datos de egresos hospitalarios, se asume que el niño no ha presentado ninguna hospitalización. Por lo tanto, si existe un problema de pérdida de datos, la base de datos no es capaz de considerar la pérdida y la historia hospitalaria del niño indicará que no ha sido hospitalizado. Por tanto, a pesar de que la pérdida de datos puede deberse a múltiples variables, se asume que estos niños gozarían de buena salud, al no haber sido hospitalizados. Los datos utilizados no corresponden a todos los nacimientos en el Gran Santiago, sino que se restringe la muestra a aquellos cuyas madres residían en alguna de las comunas con una estación meteorológica (ver subsección [5.2](#)).

A continuación, el Cuadro [1](#) muestra el total de individuos que son parte de la muestra: aquellos que tienen hermanos, y aquellos que tienen hermanos del mismo sexo. La muestra total será de un total de 99.927 hermanos, tal como muestra la columna (2) del Cuadro [1](#).

5.1.1. Alertas Ambientales

Las alertas ambientales son declaradas por el Ministerio de Salud. En el Gran Santiago es la Seremi de Salud de la Región Metropolitana quien anuncia los días con alerta, pre-emergencia y emergencia ambiental. Este

⁴Lamentablemente, hay individuos que fallecen en el hospital.

Cuadro 1: Número de Nacidos por año, considerando a hermanos, y hermanos del mismo sexo.

Año	Total Nacidos	Tiene Hermano	Tiene Hermano del mismo Sexo
2004	5.409	1.797	1.019
2005	15.792	5.207	2.931
2006	15.403	5.452	3.033
2007	17.057	6.585	3.652
2008	18.725	7.651	4.306
2009	18.794	7.844	4.304
2010	17.287	7.595	4.253
2011	19.057	8.425	4.694
2012	20.233	8.606	4.838
2013	20.260	8.344	4.590
2014	20.901	8.304	4.648
2015	20.502	7.666	4.249
2016	20.021	7.046	3.889
2017	16.136	5.252	2.901
2018	13.911	4.153	2.332
Total	259.488	99.927	55.639

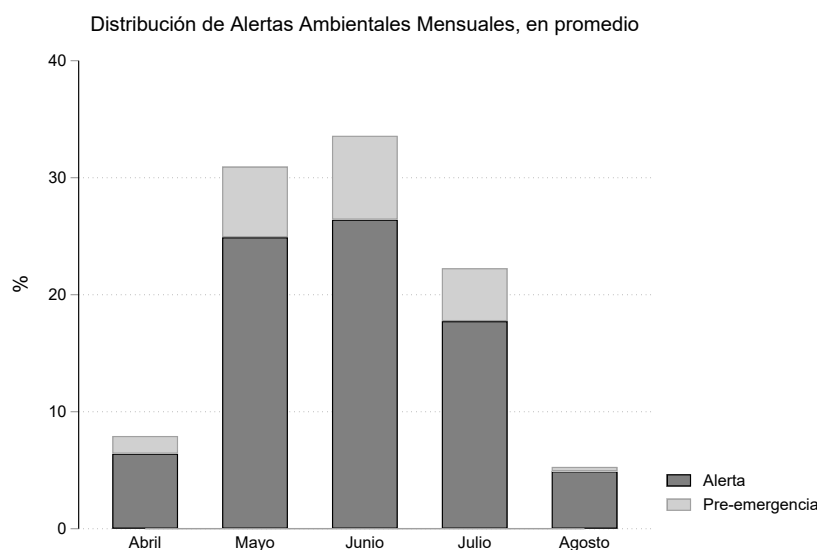
Fuente: Base de datos de nacimientos de [DEIS \[2021\]](#). Cuadro muestra el total de niños nacidos en cada año. Para las regresiones principales se utiliza el total de observaciones de niños que tienen hermanos (Columna 2).

dato es considerado una variable de control pues las mujeres embarazadas pueden tomar medidas preventivas para no verse expuestas a los altos niveles de contaminación del aire. Siguiendo a [Bharadwaj et al. \[2017\]](#) se crea una variable que corresponde a la suma trimestral del número de alertas ambientales, y se une con el trimestre de gestación de cada niño o niña. A continuación se muestra la [Figura 1](#) con la totalidad mensual de alertas. Se puede ver que el número de alertas se concentran en los meses de invierno

5.2. Ministerio de Medio Ambiente

Para medir la contaminación en el aire se utilizan datos del Sistema de Información Nacional de Calidad de Aire ([SINCA \[2020\]](#)) del Ministerio del Medio Ambiente. El SINCA recibe reportes desde el área de Meteorología de la Dirección de Aeronáutica Civil y publica datos de estaciones meteorológicas públicas y privadas. Este sistema entrega información de los niveles diarios promedio de Material Particulado respirable (MP10), Monóxido de Carbono (CO) y Ozono (O3), entre otras partículas (Revisar nota al pie número [5](#) para

Figura 1: Alertas y Pre-Emergencias ambientales



Fuente: Creación propia en base a información de la Seremi de Salud RM.

tener información sobre el resto de partículas que informan las estaciones meteorológicas, cómo se producen y sus efectos en la salud). La unidad de medida que se utiliza para las partículas en suspensión en el aire es de partes por millón (ppm). Junto a esto, las estaciones meteorológicas entregan información de variables climáticas como la velocidad y dirección del viento, la humedad relativa y la temperatura.

La partícula contaminante de Monóxido de Carbono (CO) es emitido por la combustión a bajos niveles de oxígeno, y es emitido en grandes cantidades por vehículos motorizados. Este contaminante se une al hierro en la hemoglobina, lo que inhibe la capacidad del cuerpo de suministrar oxígeno a órganos y tejidos vitales. Los efectos perjudiciales del CO se amplifican en el útero porque la molécula es capaz de traspasar la placenta, y disminuir la cantidad de oxígeno que recibe el feto. Además, se mantiene en el feto durante un largo periodo de tiempo. Por último, debido a que los sistemas cardiorespiratorios de los fetos son deficientes, son particularmente sensibles a menores cantidades de oxígeno. Por otra parte, el Ozono (O₃) es una partícula irritante del sistema respiratorio, que en el corto plazo puede generar dolor de pecho, tos e irritación de la garganta, y en el largo plazo puede disminuir la capacidad pulmonar y causar enfermedad pulmonar obstructiva crónica⁵ (Bharadwaj

⁵ Otras partículas que componen el smog y que sus efectos no son considerados en esta investigación son: son (i) el Material Particulado respirable (MP10), partículas contaminantes de menos de 10 micrómetros, las cuales son emitidas por vehículos y termoeléctricas y son inhaladas y acumuladas en el sistema respiratorio, (ii) el Material Particulado fino (MP2.5), que es similar al MP10 pero que mide menos de 2.5 micrómetros y representa un riesgo mayor porque penetra de manera más profunda en los pulmones. Además, (iii) el Óxido de Nitrógeno (NO) y (iv) Dióxido de Nitrógeno (NO₂) que se producen principalmente por el sector de transporte. Las moléculas que contienen Nitrógeno y Oxígeno en distintas proporciones son generalizadas bajo el término Óxidos de Nitrógeno (NO_x). Por último, (vi) el Dióxido de Azufre (SO₂), que se emite al utilizar combustibles fósiles. En esta investigación no se utilizan estas moléculas como variables explicativas de la historia de salud de los niños y niñas.

et al. [2013]).

Debido a los fuertes efectos negativos que tiene el Monóxido de Carbono (CO) y Ozono (O₃) en el feto, y dado que el SINCA tiene información continua de estas partículas en cada una de las comunas consideradas, esta investigación busca los efectos del CO y del O₃ en la historia de salud de los niños y niñas hasta los 10 años.

El Material Particulado Respirable (MP10) es también una partícula dañina en la salud de las personas, y, a la vez que el Monóxido de Carbono (CO), afecta a los fetos durante su gestación. En esta investigación se utiliza como variable explicativa el CO y O₃, y no el PM10 por la menor disponibilidad del MP10 en las bases de datos. Por otra parte, no se controla por el MP10 debido a la alta correlación que tiene con el CO, lo que aumentaría los errores estándar (ver Cuadro 2).

Cuadro 2: Correlación entre partículas contaminantes

	Registros CO	Registros MP10	Registros O ₃
Registros CO	1,000		
Registros MP10	0,776***	1,000	
Registros O ₃	-0,549***	-0,257***	1,000

Fuente: Creación propia a partir de datos del SINCA [2020]. Cuadro muestra la correlación entre los registros de CO, MP10 y O₃ entre 2000 y 2010. * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$, *** $p < 0,001$

Las variables climáticas que entrega el SINCA afectan en la concentración de las partículas contaminantes en el aire. Estas variables se utilizan como control pues las estaciones meteorológicas no necesariamente logran capturar los niveles reales de concentración de CO y O₃ cuando hay una alta velocidad del viento o lluvia. Esto significa que las mujeres embarazadas se verían expuestas a niveles ligeramente distintos de CO y O₃ que los estimados por la estación meteorológica. Los datos de características climáticas del SINCA comienzan en el 2004, por lo que la muestra final considera a los hermanos nacidos entre 2004 y 2018. El Cuadro 3 muestra el total de nacimientos en cada comuna desde el 2004, y el total de hermanos que serán considerados en las estimaciones, que son 99.927. La razón por la cual se utilizan los datos de niños nacidos en estas seis comunas, es para minimizar el error de medición de las variables explicativas: CO y O₃.

Existen variadas estaciones meteorológicas en el Gran Santiago. Las estaciones que entregan información de partículas contaminantes y de variables climáticas desde el 2004 son las de El Bosque, Independencia, La Florida, Las Condes, Pudahuel, La Florida, y Santiago Centro. Existen más estaciones meteorológicas pero su disponibilidad de datos comienza luego del 2004 por lo que no entregan información al respecto de la contaminación durante la gestación de los niños en estudio. La Figura 2 muestra un mapa de las comunas que son consideradas dentro de esta investigación.

Cuadro 3: Cantidad de datos por Estación Meteorológica

Estación Meteorológica	N. Hermanos nacidos en la comuna	%
Santiago	17.798	18 %
El Bosque	13.604	14 %
Independencia	5.567	6 %
La Florida	26.857	27 %
Las Condes	16.190	16 %
Pudahuel	19.911	20 %
Total	99.927	100,0 %

Fuente: Creación propia a partir de datos de nacimientos del DEIS [2021], Cuadro corresponde al número total de nacimientos de hermanos entre 2004 al 2010.

Para utilizar los datos de partículas contaminantes y características meteorológicas se calcula la media móvil trimestral (90 días) de cada una de las variables. Esto para poder hacer el link de cada semestre de gestación que tuvo el niño con las partículas contaminantes a las que estuvo expuesta su madre. Así, también siguiendo a Bharadwaj et al. [2013], se controla por las alertas ambientales trimestrales.

5.3. Estadística Descriptiva

El, número total de datos a utilizar es de 99.927, que corresponden al total de datos que (i) cumplen con tener un hermano/a al compartir el id de madre en la base de datos de nacimiento, (ii) hayan nacido (el niño/a y su hermano/a) en una de las comunas con una estación meteorológica y (iii) hayan nacido (el niño/a y su hermano/a) en el periodo entre 2004 y 2018, que corresponde a la temporalidad de estudio, dados los datos medioambientales disponibles del SINCA y hospitalarios del DEIS. El número total de datos, separado por sexo, se muestra en el Cuadro 4. La división por sexo es importante debido a que los fetos del sexo masculino desarrollan tardíamente su sistema cardiorrespiratorio con respecto a los fetos del sexo femenino, así, es una variable de control importante.

El Cuadro 5 muestra la distribución de las variables dependientes, es decir, las variables que en esta investigación se busca explicar. Dado que en esta investigación se hace una comparación entre hermanos, el número total de niños nacidos entre los años 2004 y 2018 que tienen hermanos dentro de la muestra es de 99.927. Este número disminuye a 94.914 niños que ya hayan cumplido un año el 2018, 66.808 son los niños

Figura 2: Mapa de comunas del Gran Santiago que son consideradas dentro de la investigación.



Nota: La Figura muestra el mapa del Gran Santiago, separando por comunas. Las comunas que son consideradas dentro de la investigación son las pintadas en gris: Santiago Centro, El Bosque, Independencia, La Florida, Las Condes y Pudahuel.

de la muestra que alcanzan a cumplir 5 años y son 26.405 los que ya hayan cumplido 10 años en 2018.

Cuadro 4: Cantidad de datos sexo y tener hermano/a

	Tiene hermano/a del mismo sexo		
	No	Sí	Total
Hombre	22.057 (50 %)	29.327 (53 %)	51.384 (51 %)
Mujer	22.231 (50 %)	26.312 (47 %)	48.543 (49 %)
Desconocido	0 (0 %)	0 (0 %)	0 (0 %)
Total	44.288 (100 %)	55.639 (100 %)	99.927 (100 %)

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de nacimientos del DEIS [2021], entre 2004 y 2010, en las comunas que tienen una estación meteorológica asociada. Los datos utilizados son todos los niños que tienen asociado un hermano a partir de el id de su madre. Existen niños/as que no tienen un sexo asociado, es decir, su sexo es desconocido, ninguno de estos niños/as tienen un link con un hermano a partir del id de su madre.

La muestra no considera hermanos mellizos o gemelos pues nacieron e mi misma fecha.

El resumen estadístico de las variables de contaminación ambiental son mostradas en el Cuadro 6. Para la construcción de estas variables, se calcula una media móvil trimestral. Es decir, para cada día se calcula el promedio de ese día junto a los 90 días siguientes. De esta manera, se asocia la media móvil trimestral de cada partícula o variable climática con el trimestre de gestación del niño o niña.

5.4. Distribución de las partículas contaminantes

La Figura 3 muestra el nivel de CO a través del tiempo en cada comuna con niños en estudio. Este nivel de CO es linealizado a partir de la media móvil trimestral, es decir, se calcula la media móvil de 90 días para representar el promedio al cual el feto se ve expuesto en cada uno de sus tres trimestres de gestación. De manera similar, la Figura 4 realiza el mismo cálculo de media móvil para mostrar el nivel de O3 por comuna al cual el feto se ve expuesto en cada uno de sus trimestres de gestación.

Se puede observar una clara estacionalidad en ambas partículas contaminantes. Los niveles de Ozono aumentan en verano y disminuyen en invierno, mientras que los niveles de Monóxido de Carbono aumentan en invierno y disminuyen en verano. Además de esto, las comunas tienen distintos niveles de las partículas contaminantes promedio. La Figura 3 muestra que en Las Condes el nivel promedio de CO es menor y tiene una menor varianza que en el resto de las comunas. . Por otra parte, los niveles de Ozono que se muestran en la Figura 4 son ligeramente mayores en Las Condes que en el resto de las comunas. Estas diferencias se pueden explicar por una mayor altitud de la comuna, o por una mayor cantidad de áreas verdes, aunque son variadas las razones

Cuadro 5: Estadística Descriptiva de Variables Dependientes.

		Media	Desv. St.	Min	Máx	N
Características al nacer						
Peso (gr)		3.271,50	579,15	200	5.740	99.927
Indicador de bajo peso ($\leq 2,500\text{gr}$)		0,08	0,28	0	1	99.927
Talla (cm)		49,08	2,83	18	59	99.927
Semanas de Gestación		38,24	2,08	16	43	99.927
Niño/a ha estado hospitalizado (Sí = 1)						
Al año 1	Total	0,26	0,44	0	1	94.914
	Por problemas respiratorios	0,18	0,39	0	1	94.914
A los 5 años	Total	0,35	0,48	0	1	66.808
	Por problemas respiratorios	0,23	0,42	0	1	66.808
A los 10 años	Total	0,40	0,49	0	1	26.405
	Por problemas respiratorios	0,23	0,42	0	1	26.405
Días de Estadía hospitalizados						
Al año 1	Total	2,43	10,68	0	350	94.914
	Por problemas respiratorios	1,95	9,61	0	333	94.914
A los 5 años	Total	2,91	15,58	0	1.090	66.808
	Por problemas respiratorios	2,05	11,97	0	991	66.808
A los 10 años	Total	3,20	26,21	0	2.624	26.405
	Por problemas respiratorios	2,01	22,64	0	2.361	26.405

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del [DEIS \[2021\]](#), se utilizan datos de niños nacidos entre 2004 y 2018. El total de datos de características al nacer dependen de la disponibilidad en las bases de datos. El total de datos en las líneas de la dummy de haber estado hospitalizado y días de estadía hospitalaria dependen además de la edad del niño/a en 2018, último año disponible en la base de datos de hospitalizaciones.

por las cuales las comunas tienen distintos niveles de partículas contaminantes. La estrategia metodológica utilizada en esta investigación controla por la comuna de la estación meteorológica para poder considerar las características intrínsecas de la comuna.

La estrategia de identificación requiere de variabilidad en las variables explicativas entre los niños. Así, es necesario que los niveles de las partículas contaminantes no sean explicados en su totalidad por la madre o la fecha de nacimiento de los niños. Si el nivel de CO y O₃ fueran explicados en su totalidad por estas dos variables, significaría que las diferencias en sus características de salud son explicadas por su fecha al nacer y su madre, más que por la contaminación durante su gestación. Así, la [Figura 5](#) muestra los residuos al regresionar

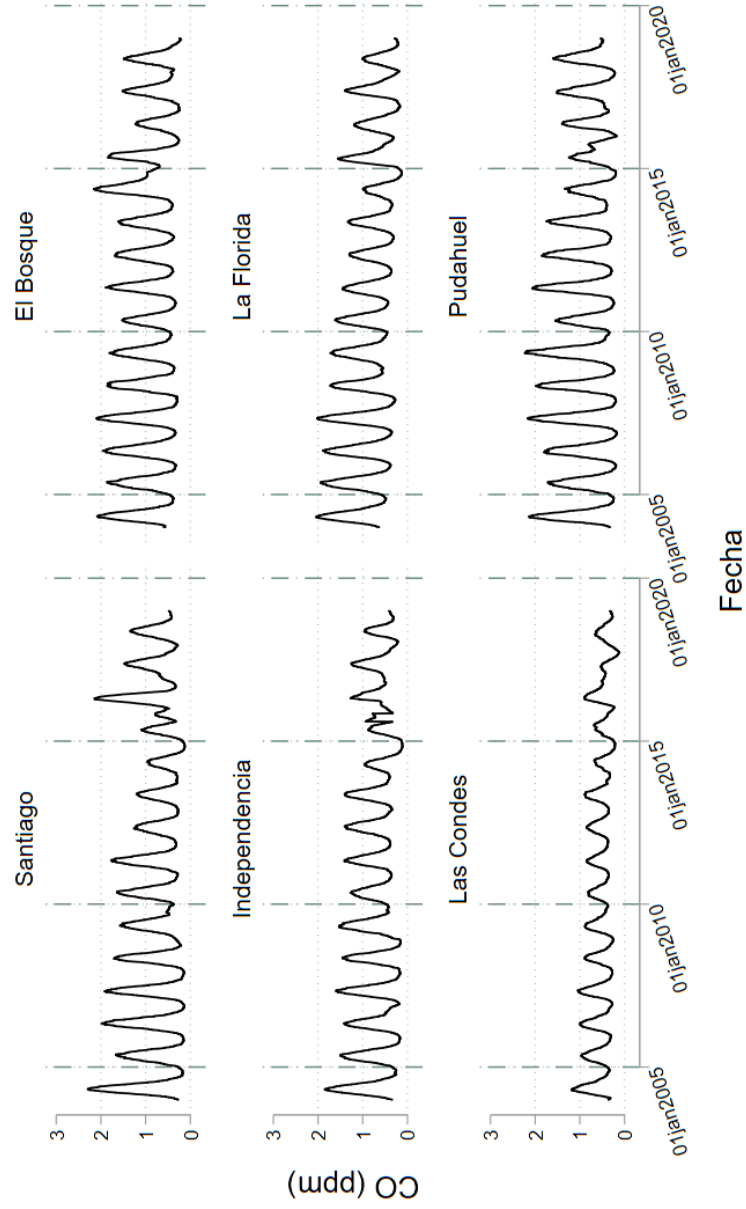
Cuadro 6: Estadística Descriptiva de Variables Explicativas.

		Media	Desv. St.	Min	Máx
CO diario (ppm)	Trimestre 1	0,77	0,48	0,11	2,30
	Trimestre 2	0,77	0,48	0,11	2,30
	Trimestre 3	0,75	0,46	0,11	2,23
O3 diario (ppm)	Trimestre 1	14,52	6,27	1,37	29,44
	Trimestre 2	14,50	6,32	1,37	29,56
	Trimestre 3	14,58	6,29	1,37	36,81
Humedad Relativa (%)	Trimestre 1	60,18	8,07	40,23	89,12
	Trimestre 2	60,09	8,01	40,23	89,25
	Trimestre 3	59,77	7,99	40,23	89,25
Temperatura Máxima diaria (°C)	Trimestre 1	23,03	4,93	7,94	33,09
	Trimestre 2	23,02	4,90	7,94	33,09
	Trimestre 3	23,11	4,92	7,94	33,09
Velocidad del Viento (m/s)	Trimestre 1	1,28	0,48	0,49	5,03
	Trimestre 2	1,29	0,52	0,49	5,53
	Trimestre 3	1,31	0,58	0,49	6,71
Número de Alertas ambientales	Trimestre 1	2,46	5,73	0,00	29,00
	Trimestre 2	2,38	5,66	0,00	29,00
	Trimestre 3	2,25	5,53	0,00	29,00

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del [SINCA \[2020\]](#) y Seremi [de Salud RM](#) de los años 2004 al 2018. Los datos muestran el promedio de valores del nivel de CO, O3, humedad relativa, temperatura máxima, velocidad del viento y el número de alertas ambientales en cada trimestre de gestación de los niños. Los datos muestran los promedios de las comunas de Santiago, El Bosque, Independencia, La Florida, Las Condes y Pudahuel y se encuentran ponderados por el número de niños asociados a cada trimestre y comuna de la estación meteorológica.

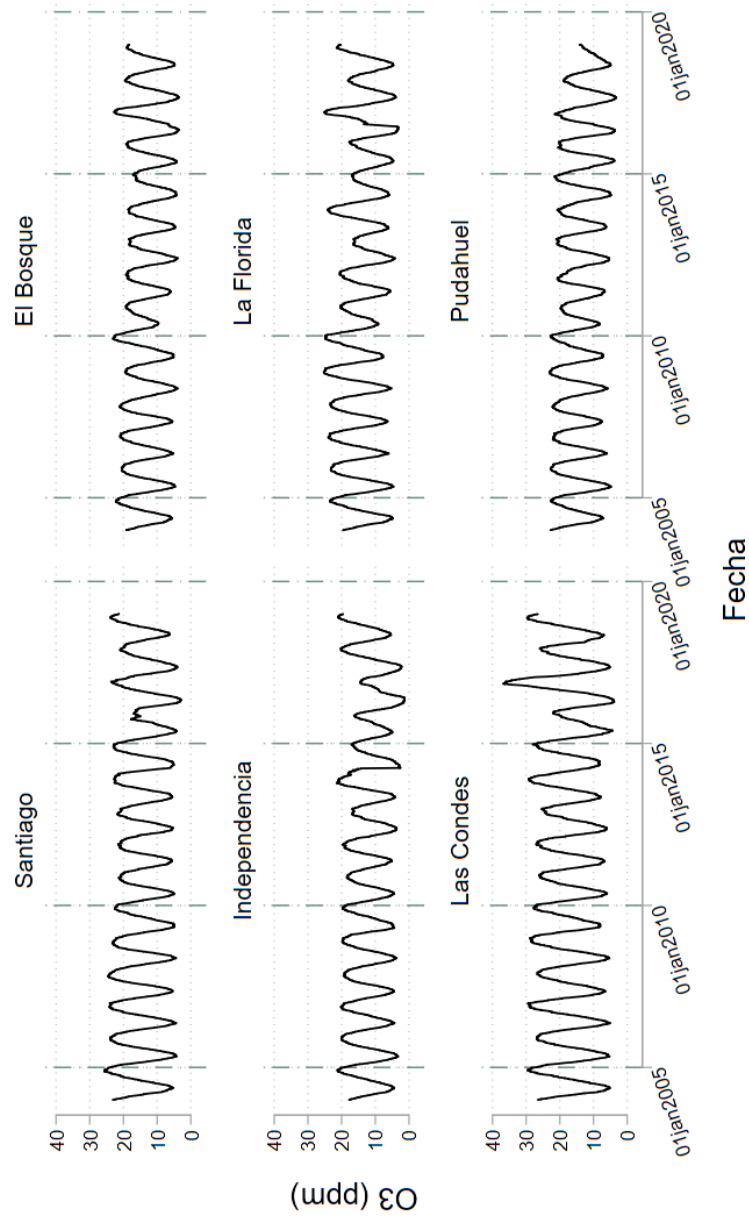
los niveles de CO y O3 con el año y mes o el id de la madre como variables explicativas. La Figura muestra que existe varianza en la distribución de los residuos, lo que significa que los niveles de Monóxido de Carbono (CO) y Ozono (O3) no son explicados en su totalidad por el id de la madre ni la fecha (año-mes). Por lo tanto, existe variación entre hermanos de los niveles de partículas contaminantes durante su gestación.

Figura 3: Distribución de los niveles de Monóxido de Carbono (CO) por comuna (2004-2018)



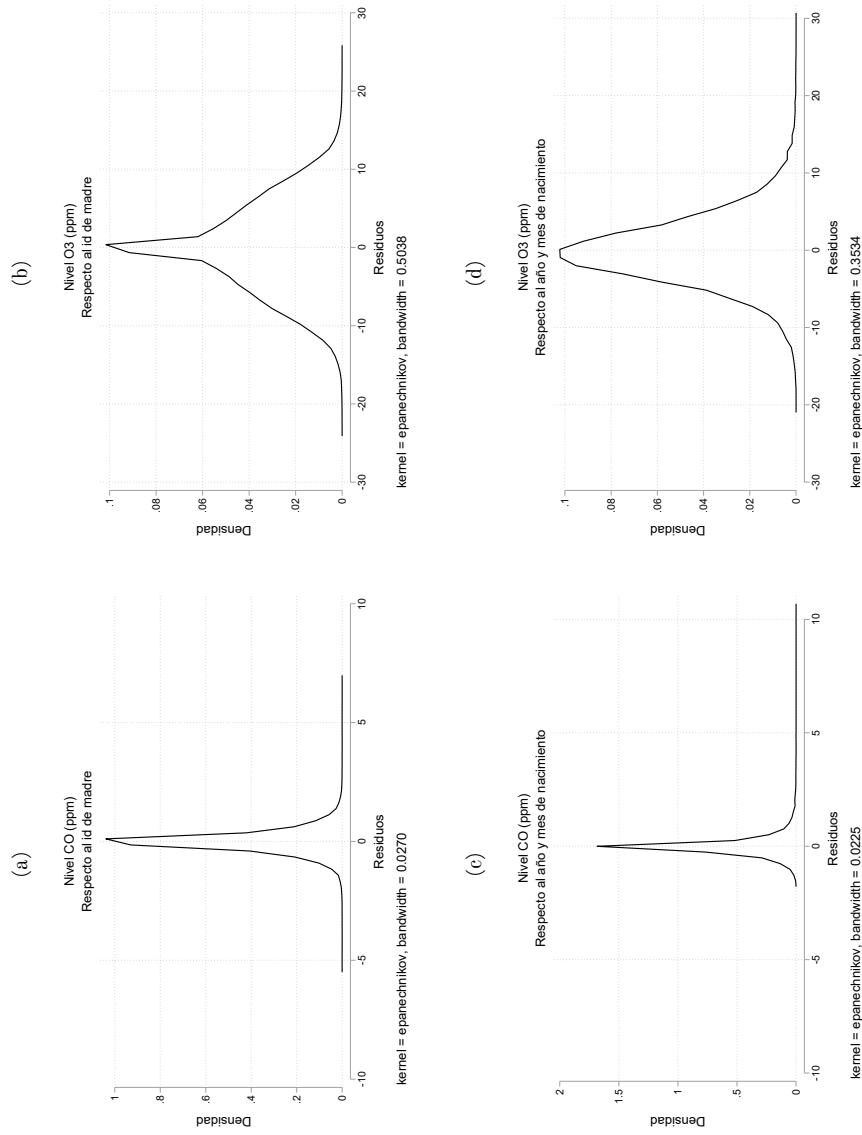
Creación propia a partir de datos del SINCA [2020] entre los años 2004 y 2018. La figura muestra la distribución de la media móvil trimestral del nivel de CO por comuna.

Figura 4: Distribución de los niveles de Ozono (O3) por comuna (2004-2018)



Creación propia a partir de datos del SINCA [2020] entre los años 2004 y 2018. La figura muestra la distribución de la media móvil trimestral del nivel de O3 por comuna.

Figura 5: Residuos al explicar el CO y O3 con el id de la madre y la fecha (año-mes)



Creación propia a partir de datos del DEIS [2021] y del SINCA [2020] entre los años 2004 y 2018. La Figura muestra la distribución de los residuos de las regresiones del nivel de CO y O3, por separado, con respecto al id de la madre y la fecha (año y mes). El hecho de que los niveles de CO y de O3 no sean explicados de manera exacta por el id de la madre ni la fecha, implica que existe una variación del nivel de CO y O3 entre hermanos, resultado necesario para la validez de la estrategia de identificación.

6. Resultados

A continuación se muestran los resultados de las estimaciones del efecto del CO y O₃ en cada trimestre de gestación en la salud de los niños y niñas. Primero, se muestran los resultados en las características al nacer: peso (gr), nacer con bajo peso (< 2,500gr), talla (cm) y semanas de gestación.

Luego, se muestran los efectos de la contaminación de CO y O₃ en los tres trimestres de gestación en variables hospitalarias de los niños: si han sido hospitalizados por cualquier enfermedad y por alguna enfermedad relacionada al sistema cardiorrespiratorio, y los días cama que han utilizado por cualquier enfermedad o asociados a alguna enfermedad cardiorrespiratoria.

6.1. Resultados de características al nacer

Los Cuadros 7, 8, 9 y 10 muestran los resultados del efecto de CO y O₃ en las características al nacer de los niños. La estimación utiliza efectos fijos de madre. Se puede observar a grandes rasgos que en los 4 cuadros, que las estimaciones no son estables al agregar controles. Las columnas (1) y (4) de cada uno de los 4 cuadros muestran las estimaciones utilizando solo como variables explicativas los niveles trimestrales de CO y O₃, y solo controlando por el efecto fijo de la madre, para comparar entre hermanos, y por el sexo del niño/a. Las columnas (2) y (4) agregan control de efecto fijo por comuna y por el año y mes de nacimiento del niño/a. Por último, las columnas (3) y (6) controlan por la edad de la madre (como efecto fijo para no asumir linealidades), por la interacción de año, mes y comuna de nacimiento de niño/a y las características climáticas.

Con respecto al peso al nacer (cuadro 7), sin agregar controles (columna 1), la estimación muestra que aumentar en 1ppm la concentración de CO en los trimestres 1 y 3 disminuye el peso al nacer en 29,3 y 26,2 gr respectivamente, de manera significativa. Lo mismo ocurre con el O₃ (columna 3): el aumento de 1ppm en la concentración de O₃ en los trimestre 1 y 3 disminuye el peso al nacer en 2,3 y 2,7 gr cada una. La desviación estándar del CO en el trimestre 1 es de 0,48, y en el trimestre 3 es de 0,46 (ver Cuadro 6). Esto muestra que es muy difícil un aumento de magnitud de 1ppm de CO, por otra parte, la desviación estándar del O₃ es de 6,27, por lo que un aumento de 1ppm sí es algo plausible.

Estos resultados son muy pequeños en magnitud: menos de 40gr de efecto por CO y 4 gr de efecto con O₃, además, los resultados no son robustos a incluir los efectos fijos de la edad de la madre, el mes y año de nacimiento, la comuna y las características climáticas. Se podría comentar, por lo tanto, que probablemente existe un efecto negativo de la contaminación de CO y O₃ durante la gestación en el peso al nacer, pero este resultado se puede deber también a la fecha y comuna de nacimiento, y al resto de las características climáticas.

El Cuadro 8 calcula de manera lineal el efecto de la contaminación trimestral en el hecho de que el niño/a nazca bajo peso. Los resultados en general son muy cercanos a cero y no son significativos. Por tanto, este modelo no logra explicar que los niños/as nazcan con bajo peso. Incluso, la literatura muestra que las niñas

tienen un mayor peso al nacer, pero en esta especificación se muestra que el ser mujer aumentaría la probabilidad de tener bajo peso.

Con respecto a la talla (cm) (Cuadro 9) de los niños y niñas, los modelos muestran que en general el nivel de contaminación aumentaría la talla de los niños. Los efectos son cercanos a cero pero significativos. El número de semanas de gestación se muestra en el Cuadro 10 se vería afectado de manera positiva en las distintas especificaciones. A pesar de que los resultados son cercanos a cero, el único coeficiente negativo y significativo es el de la columna (5), mostrando que si se controla por la comuna y el año y mes de nacimiento el efecto del aumentar el nivel de O₃ en 1ppm durante el tercer trimestre, disminuiría el número de semanas de gestación en 0,009 semanas. El resto de los coeficientes son positivos y/o no significativos.

Los resultados mostrados en el Cuadro 10 son totalmente contraintuitivos. Muestran que un aumento de CO y de O₃ en cualquier trimestre de gestación aumentaría el número de semanas de gestación.

A modo de resumen, (i) los resultados en general son contraintuitivos en cada uno de los modelos, se esperaría que aumentos en los niveles de contaminación durante la gestación afectaran de manera negativa a las variables de salud al nacer de los niños, y (ii) los coeficientes no son estables al agregar controles importantes en la literatura. Es necesario tener en cuenta que incluso resultados muy pequeños tienen efectos muy importantes en temas de salud pública, pero los resultados de esta investigación no son concluyentes al respecto de la importancia de disminuir la contaminación para mejorar la salud al nacer.

Dentro de todas las especificaciones, el Cuadro 7, que muestra la estimación de los efectos de la contaminación en el peso al nacer, en su primera especificación (Columna 1 para CO y 4 para O₃), sería la única especificación que lograría mostrar un efecto plausible: que aumentos en los niveles de contaminación durante el primer y tercer trimestre afecten de manera negativa en el peso al nacer, como se comentó en la subsección 6.1. La partícula de CO es capaz de traspasar la placenta, por lo que se esperaría un efecto negativo de aumentos de CO durante el primer trimestre en el peso al nacer. Al agregar controles (Columnas 2 y 3), la estimación mantiene su signo negativo pero pierde su significancia.

Esto llama a seguir profundizando en la investigación del efecto de la contaminación durante la gestación. Claramente el resultado de que la contaminación tenga efectos positivos en la salud al nacer es contraintuitivo. Puede que en esta investigación existan variables omitidas relevantes en estas especificaciones, que generan resultados contraintuitivos y poco estables a controles.

Cuadro 7: Efecto de la Concentración de Monóxido de Carbono y Ozono en Peso (gr) al nacer. Comparación con Efecto Fijo de hermanos.

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	Peso	Peso	Peso	Peso	Peso	Peso
CO - Trimestre 1	-29.33*** (-5.23)	-13.20 (-1.38)	-59.75 (-1.57)			
CO - Trimestre 2	4.954 (1.24)	37.40*** (4.00)	77.79 (1.79)			
CO - Trimestre 3	-26.24*** (-4.48)	-2.648 (-0.27)	145.5*** (3.71)			
O3 - Trimestre 1				-2.310*** (-4.14)	3.465** (3.20)	22.07*** (5.96)
O3 - Trimestre 2				-0.805** (-2.61)	-2.632** (-2.81)	19.03*** (5.27)
O3 - Trimestre 3				-2.729*** (-4.89)	2.059 (1.95)	21.40*** (5.94)
Mujer	-98.84*** (-27.37)	-99.39*** (-27.55)	-99.32*** (-26.71)	-99.07*** (-27.43)	-99.35*** (-27.54)	-99.45*** (-26.75)
Constant	3358.0*** (388.48)	3334.2*** (90.13)	-214.5 (-0.23)	3404.6*** (223.74)	3312.7*** (78.63)	-687.0 (-0.73)
Edad Madre (EF)			Sí			Sí
EF comuna		Sí			Sí	
EF año y mes		Sí			Sí	
EF año, mes y comuna			Sí			Sí
Caract. climáticas			Sí			Sí
R^2	0.723	0.725	0.735	0.723	0.725	0.736
Observations	99927	99927	94689	99927	99927	94689

Estadísticos t entre paréntesis

* $p < 0,05$, ** $p < 0,01$, *** $p < 0,001$

Cuadro 8: Efecto de la Concentración de Monóxido de Carbono y Ozono en Tener bajo peso (< 2,5kg) al nacer.
Comparación con Efecto Fijo de hermanos.

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	Bajo Peso	Bajo Peso	Bajo Peso	Bajo Peso	Bajo Peso	Bajo Peso
CO - Trimestre 1	-0.00561 (-1.90)	-0.00450 (-0.89)	-0.0142 (-0.70)			
CO - Trimestre 2	-0.000484 (-0.23)	-0.0139** (-2.83)	-0.0339 (-1.47)			
CO - Trimestre 3	-0.00455 (-1.47)	-0.000576 (-0.11)	-0.0710*** (-3.41)			
O3 - Trimestre 1				-0.000581* (-1.98)	-0.00111 (-1.94)	-0.00946*** (-4.80)
O3 - Trimestre 2				-0.0000561 (-0.35)	0.00142** (2.86)	-0.00557** (-2.90)
O3 - Trimestre 3				-0.000616* (-2.10)	-0.000927 (-1.66)	-0.00754*** (-3.94)
Mujer	0.00720*** (3.78)	0.00713*** (3.74)	0.00697*** (3.53)	0.00716*** (3.76)	0.00714*** (3.75)	0.00703*** (3.56)
Constant	0.0872*** (19.15)	0.0870*** (4.45)	0.240 (0.48)	0.0974*** (12.14)	0.0842*** (3.78)	0.351 (0.70)
Edad Madre (EF)			Sí			Sí
EF comuna		Sí			Sí	
EF año y mes		Sí			Sí	
EF año, mes y comuna			Sí			Sí
Caract. climáticas			Sí			Sí
R^2	0.659	0.661	0.672	0.659	0.661	0.672
Observations	99927	99927	94689	99927	99927	94689

Estadísticos t entre paréntesis

* $p < 0,05$, ** $p < 0,01$, *** $p < 0,001$

Cuadro 9: Efecto de la Concentración de Monóxido de Carbono y Ozono en la Talla (cm) al nacer. Comparación con Efecto Fijo de hermanos.

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	Talla (cm)	Talla (cm)	Talla (cm)	Talla (cm)	Talla (cm)	Talla (cm)
CO - Trimestre 1	0.263*** (8.97)	0.0166 (0.33)	-0.622** (-3.14)			
CO - Trimestre 2	0.0898*** (4.31)	0.202*** (4.16)	0.341 (1.51)			
CO - Trimestre 3	0.226*** (7.38)	0.00670 (0.13)	0.961*** (4.72)			
O3 - Trimestre 1				0.0461*** (15.84)	0.0255*** (4.52)	0.107*** (5.55)
O3 - Trimestre 2				-0.00182 (-1.13)	-0.00967* (-1.99)	0.0919*** (4.89)
O3 - Trimestre 3				0.0490*** (16.82)	0.0307*** (5.58)	0.113*** (6.01)
Mujer	-0.618*** (-32.68)	-0.610*** (-32.55)	-0.604*** (-31.23)	-0.614*** (-32.55)	-0.611*** (-32.57)	-0.605*** (-31.28)
Constant	48.94*** (1081.60)	48.69*** (253.22)	24.12*** (4.91)	48.02*** (603.91)	48.24*** (220.35)	21.37*** (4.37)
Edad Madre (EF)			Sí			Sí
EF comuna		Sí			Sí	
EF año y mes		Sí			Sí	
EF año, mes y comuna			Sí			Sí
Caract. climáticas			Sí			Sí
R^2	0.682	0.690	0.702	0.683	0.690	0.702
Observations	99927	99927	94689	99927	99927	94689

Estadísticos t entre paréntesis

* $p < 0,05$, ** $p < 0,01$, *** $p < 0,001$

Cuadro 10: Efecto de la Concentración de Monóxido de Carbono y Ozono en las Semanas de Gestación. Comparación con Efecto Fijo de hermanos.

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	Semanas	Semanas	Semanas	Semanas	Semanas	Semanas
CO - Trimestre 1	0.209*** (9.60)	0.000772 (0.02)	-0.220 (-1.50)			
CO - Trimestre 2	0.0763*** (4.93)	0.168*** (4.68)	0.525** (3.14)			
CO - Trimestre 3	0.186*** (8.17)	-0.0225 (-0.60)	0.882*** (5.84)			
O3 - Trimestre 1				0.0316*** (14.64)	0.00902* (2.16)	0.0898*** (6.29)
O3 - Trimestre 2				-0.000460 (-0.38)	-0.00941** (-2.60)	0.0790*** (5.68)
O3 - Trimestre 3				0.0328*** (15.18)	0.00426 (1.04)	0.0751*** (5.41)
Mujer	0.0685*** (4.89)	0.0736*** (5.29)	0.0778*** (5.43)	0.0710*** (5.07)	0.0739*** (5.31)	0.0773*** (5.40)
Constant	37.85*** (1127.86)	37.82*** (265.08)	22.46*** (6.17)	37.28*** (631.65)	37.89*** (233.21)	21.34*** (5.89)
Edad Madre (EF)			Sí			Sí
EF comuna		Sí			Sí	
EF año y mes		Sí			Sí	
EF año, mes y comuna			Sí			Sí
Caract. climáticas			Sí			Sí
R^2	0.677	0.684	0.698	0.678	0.684	0.699
Observations	99927	99927	94689	99927	99927	94689

Estadísticos t entre paréntesis

* $p < 0,05$, ** $p < 0,01$, *** $p < 0,001$

6.2. Resultados en salud a los 1, 5 y 10 años

En esta sección se muestra el efecto de los niveles de contaminación durante la gestación en la salud de los niños a los 1, 5 y 10 años. Las variables proxy de salud que se utilizan son si el niño/a ha estado hospitalizado, y el número de días que ha estado hospitalizado (días cama) a cada edad. El modelo utilizado es explicado en sección de Metodología (4.2) y la ecuación mostrada es la equivalente a las columnas (3) y (6) de los cuadros 7, 8, 9 y 10 de la sección de Resultados de características al nacer (6.1).

Las variables hospitalarias son en general difíciles de afectar, en especial debido a la inversión en salud que realizan las familias en niños más enfermizos. Así, variables como el número de consultas médicas son otra aproximación que podría llegar a tener resultados más significativos. En esta investigación no se utilizan ese tipo de variables debido a que no están disponibles de manera pública.

La ecuación que se considera, utiliza efectos fijos por madre, efectos fijos por edad de la madre y efectos fijos por el año, mes y comuna de nacimiento, además de controlar por las características climáticas trimestrales: velocidad del viento, promedio de temperatura máxima, humedad relativa y número de alertas ambientales. La razón por la cual se utiliza esta ecuación es que la literatura la avala, por lo que no se considera que los resultados de la subsección de características al nacer (6.1) no obtiene estimadores significativos utilizando esta ecuación. En esta sección solo se muestran los resultados de esta ecuación, mostrando el efecto de los niveles trimestrales de CO y O₃ en las variables hospitalarias de los niños a los 1, 5 y 10 años.

El Cuadro 11 muestra cómo los niveles de CO y O₃ en cada trimestre de gestación afectan en la probabilidad de haber estado hospitalizado teniendo 1 año y el número de días de hospitalización. Es interesante que las columnas (3) y (4) muestran que un aumento del nivel de CO durante el segundo trimestre de gestación afecta de manera positiva a la cantidad de días que han estado hospitalizados los niños de 1 año, tanto por cualquier enfermedad como por enfermedades específicamente relacionadas al sistema respiratorio: un aumento de 1ppm de CO durante el segundo trimestre aumentaría en 5 los días en los que el niño ha estado hospitalizado. Este efecto no se condice con los resultados de la sección de Resultados de características al nacer (6.1), pues el nivel de contaminación de CO del segundo trimestre tiene efectos contraintuitivos en las características al nacer, por ejemplo, un aumento de la concentración de CO se relaciona con un aumento del peso al nacer, tal como muestra la columna (2) del cuadro 7.

Con respecto a los efectos de los niveles trimestrales de O₃ en la probabilidad de haber estado hospitalizado y los días cama utilizados al primer año de vida, las estimaciones muestran resultados contraintuitivos. Un aumento en el nivel de O₃ durante el tercer trimestre de gestación afectaría de manera negativa en la probabilidad de haber estado hospitalizado y en el número de días hospitalizados de los niños de 1 año, tanto por cualquier enfermedad como por enfermedades relacionadas al sistema cardiorrespiratorio. Las columnas (6) de las tablas mostradas en la sección de salud al nacer (6.1) muestran también resultados contraintuitivos al observar que aumentos en los niveles de CO tendrían un efecto positivo en el peso al nacer, talla y número de

semanas de gestación.

Con respecto a los Cuadros 12 y 13, éstos muestran una difusión casi completa de los efectos de la contaminación en las variables proxy de salud a los 5 y 10 años: hospitalización y número de días cama. Esto es esperable dada la cantidad de variables que afectan a los niños a través del tiempo. Solo se muestra que el estimador de la variable de concentración de CO en el trimestre 1 afectaría de manera negativa en la cantidad de días hospitalizados de los niños hasta los 5 años, lo cual es un resultado totalmente contraintuitivo. A la edad de 10 años, las variables explicativas del nivel de contaminación de CO y O3 en cada trimestre de gestación no tienen efectos significativos en la probabilidad de haber sido hospitalizados ni el número de días en los que estuvo hospitalizado, tanto por cualquier enfermedad como por enfermedades relacionadas al sistema cardiorrespiratorio.

Cuadro 11: Efecto del CO y O3 en estar hospitalizado y días cama por cualquier enfermedad o por enfermedad cardiorrespiratoria al tener 1 año.

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
	Hosp	Hosp. resp	Días	Días resp	Hosp	Hosp. resp	Días	Días resp
CO - Trimestre 1	0.0122 (0.29)	-0.0458 (-1.23)	1.364 (1.35)	0.708 (0.79)				
CO - Trimestre 2	0.0514 (1.07)	0.0470 (1.11)	5.040*** (4.40)	4.869*** (4.78)				
CO - Trimestre 3	0.0470 (1.09)	0.0576 (1.52)	1.034 (1.01)	0.421 (0.46)				
O3 - Trimestre 1					-0.00646 (-1.58)	-0.00178 (-0.49)	-0.167 (-1.71)	-0.154 (-1.77)
O3 - Trimestre 2					-0.00647 (-1.60)	-0.00590 (-1.66)	-0.118 (-1.23)	-0.160 (-1.87)
O3 - Trimestre 3					-0.0110** (-2.78)	-0.00707* (-2.04)	-0.122 (-1.30)	-0.210* (-2.52)
Constant	0.369 (0.39)	-0.0989 (-0.12)	-24.43 (-1.08)	-18.60 (-0.92)	0.753 (0.80)	0.103 (0.12)	-9.292 (-0.41)	-3.601 (-0.18)
Edad Madre (EF)	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
EF año, mes y comuna	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Caract. climáticas	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
R^2	0.535	0.540	0.554	0.566	0.535	0.540	0.554	0.565
Observations	86424	86424	86424	86424	86424	86424	86424	86424

Estadísticos t entre paréntesis

* $p < 0,05$, ** $p < 0,01$, *** $p < 0,001$

Cuadro 12: Efecto del CO y O3 en estar hospitalizado y días cama por cualquier enfermedad o por enfermedad cardiorrespiratoria al tener 5 años.

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
	Hosp	Hosp. resp	Días	Días resp	Hosp	Hosp. resp	Días	Días resp
CO - Trimestre 1	-0.121 (-1.67)	-0.146* (-2.31)	-1.443 (-0.58)	-2.362 (-1.37)				
CO - Trimestre 2	0.113 (1.34)	0.0854 (1.16)	0.627 (0.22)	1.732 (0.86)				
CO - Trimestre 3	0.206** (2.76)	0.194** (2.97)	3.041 (1.18)	3.240 (1.82)				
O3 - Trimestre 1					-0.00385 (-0.48)	-0.00664 (-0.95)	-0.834** (-3.04)	-0.572** (-3.01)
O3 - Trimestre 2					0.00132 (0.16)	-0.00217 (-0.29)	-0.579* (-2.00)	-0.352 (-1.75)
O3 - Trimestre 3					-0.0103 (-1.31)	-0.0105 (-1.53)	-0.0424 (-0.16)	-0.500** (-2.67)
Constant	1.634 (1.30)	0.701 (0.64)	20.32 (0.47)	7.030 (0.24)	2.063 (1.72)	0.945 (0.90)	13.25 (0.32)	9.988 (0.35)
Edad Madre (EF)	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
EF año, mes y comuna	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Caract. climáticas	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
R^2	0.554	0.557	0.532	0.555	0.554	0.557	0.532	0.555
Observations	47591	47591	47591	47591	47591	47591	47591	47591

Estadísticos t entre paréntesis

* $p < 0,05$, ** $p < 0,01$, *** $p < 0,001$

Cuadro 13: Efecto del CO y O3 en estar hospitalizado y días cama por cualquier enfermedad o por enfermedad cardiorrespiratoria al tener 10 años.

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
	Hosp	Hosp. resp	Días	Días resp	Hosp	Hosp. resp	Días	Días resp
CO - Trimestre 1	0.0609 (0.32)	0.165 (1.02)	6.903 (1.36)	5.169 (1.30)				
CO - Trimestre 2	-0.138 (-0.59)	0.235 (1.18)	7.486 (1.19)	5.304 (1.08)				
CO - Trimestre 3	-0.0316 (-0.16)	0.201 (1.19)	3.490 (0.66)	3.176 (0.77)				
O3 - Trimestre 1					-0.0121 (-0.60)	-0.00381 (-0.22)	-1.006 (-1.84)	-0.849* (-1.99)
O3 - Trimestre 2					-0.00570 (-0.25)	0.00135 (0.07)	-0.554 (-0.92)	-0.240 (-0.51)
O3 - Trimestre 3					-0.00683 (-0.34)	-0.0153 (-0.89)	-0.0936 (-0.17)	0.0478 (0.11)
Constant	-1.144 (-0.44)	-4.284 (-1.90)	-156.0* (-2.20)	-102.2 (-1.84)	-1.408 (-0.58)	-2.870 (-1.38)	-103.0 (-1.58)	-59.39 (-1.16)
Edad Madre (EF)	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
EF año, mes y comuna	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Caract. climáticas	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
R^2	0.599	0.612	0.631	0.656	0.599	0.612	0.631	0.656
Observations	9138	9138	9138	9138	9138	9138	9138	9138

Estadísticos t entre paréntesis

* $p < 0,05$, ** $p < 0,01$, *** $p < 0,001$

7. Conclusión

La presente investigación busca mostrar el efecto de la contaminación durante la gestación en la historia de salud de los niños en su nacimiento, al primer año de vida y a los 5 y 10 años. Existe amplia literatura sobre el impacto de la contaminación en la salud (Currie and Walker [2011], Knittel et al. [2016], entre otros), pero no se ha investigado de manera profunda en los efectos de la contaminación en edades tempranas de los niños, más allá que características al nacer. Generar una historia de su salud permite observar los efectos de corto y mediano plazo de la contaminación durante la gestación. Por lo tanto, esta investigación pretende cubrir un aspecto de la literatura que no ha sido investigado en profundidad: efectos durante la infancia de la contaminación durante la gestación.

El ordenamiento de la población entre ambientes con distintos niveles de contaminación no es aleatorio sino que responde a preferencias, incentivos y restricciones (Chay and Greenstone [2005]). Así, la contaminación a la que se ve expuesta la madre durante los tres trimestres de gestación no es aleatoria, por lo que la metodología que se usa es de efectos fijos entre hermanos, asumiendo así que entre hermanos se comparten variables no observables familiares. Estos hermanos, al haber nacido en fechas distintas, estuvieron expuestos a distintos niveles de CO y O₃ durante su gestación. En la estimación se utilizan como variables de control el efecto fijo del año, mes y comuna de nacimiento, efecto fijo de la edad de la madre, y las características medioambientales durante su gestación: temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y alertas ambientales.

Para disminuir el error de medición de las variables explicativas, se utilizan los datos de los niños nacidos en comunas del Gran Santiago donde existe una estación de meteorología que mida tanto los niveles de CO y O₃, como las variables medioambientales. Se asume que la madre estuvo expuesta a los niveles de contaminación medidos por el monitor de su comuna de residencia.

Los datos muestran que los efectos de la contaminación durante los tres trimestres de gestación de los niveles de ambas partículas contaminantes en estudio son muy bajos en las variables al nacer de los niños/as, solo encontrando un efecto negativo de los niveles de CO y O₃ en los trimestres 1 y 3 en el peso al nacer, resultados que no son estables a la inclusión de controles.

Los pequeños efectos que se encuentran en las variables al nacer, se disipan a medida que los niños van creciendo. Esto, probablemente por las diversas fuentes de exposición a contaminación a medida que crecen, y otras variables que afectan a los niños en su salud a través del tiempo.

Esta investigación se basa en la metodología utilizada en Bharadwaj et al. [2017], donde investigan el efecto de la contaminación durante la gestación en el SIMCE de 4° básico de niños nacidos en el Gran Santiago. Utilizan efectos fijos por madre, y controlan también por el año, mes y comuna de nacimiento⁶. Los

⁶En este caso, controlan por la estación meteorológica a la cual su madre está linkeada para medir los niveles trimestrales de CO durante su gestación. Las estaciones meteorológicas en funcionamiento estaban en Santiago Centro, Independencia y Las Condes.

resultados de aquella investigación son singificativos: haber estado expuestos a un mayor nivel de CO durante el tercer trimestre de gestación disminuye el rendimiento academico de los niños: encuentran que el aumento de 1ppm de CO durante el tercer trimestre disminuye en 0,036 desviaciones estándar los resultados del SIMCE de matemáticas, y en 0,042 desviaciones estándar en el SIMCE de Lenguaje. Así, a pesar de que en la presente investigación los efectos de la contaminación durante la gestación son pequeños en características al nacer y disipados a través del tiempo, obteniendo resultados nulos a los 10 años, el paper de [Bharadwaj et al. \[2017\]](#) sí logra encontrar efectos en el desarrollo cognitivo de los niños a los 10 años.

Dado que los datos utilizados son prácticamente los mismos⁷, pero los niveles de contaminación afectarían en el aprendizaje y desarrollo cognitivo de los niños, mas no en las enfermedades desarrolladas, se plantea que la contaminación atmosférica puede tener efectos en el desarrollo cognitivo de los niños a través de su efecto en el desarrollo del sistema nervioso durante la gestación. Por otra parte, la literatura no ha profundizado en cómo el desarrollo de enfermedades debido a la contaminación condicionan el aprendizaje de los niños.

Los niños y niñas que presentan distintas enfermedades como la enfermedad celíaca, hipoteroidismo, anorexia nerviosa y malnutrición, entre otras, disminuyen la producción de celulas madre de crecimiento. El concepto de *Catch Up Growth* es explicado por [De Wit et al. \[2013\]](#), y se refiere a cómo al resolver estas situaciones y enfermedades que inhiben la produccion de células del crecimiento, los niños logran aumentar la cantidad de células madre del crecimiento y alcanzan una altura dentro de los rangos de la norma de su edad. Incluso, otra de las causas de la disminución de células madre del crecimiento es el retraso del crecimiento intrauterino, causado en general por consumo excesivo de tabaco y alcohol por parte de la madre durante la gestación, problema que aumenta la probabilidad de muerte fetal, pero que al nacer, el bebé puede aumentar sus células de crecimiento, mostrando un *Catch Up Growth*.

Así, tal como niños y niñas con problemas para producir células de crecimiento pueden tener un *Catch Up Growth*, en términos de salud los niños pueden tener visitas a distintos médicos y tratamiento de enfermedades, y así pueden mejorar sin haber sido nunca hospitalizados. Lo que implica también una mayor inversión en salud por parte de la familia en niños más enfermizos, tema que esta investigación no es capaz de hacerse cargo debido a la falta de datos. Así, es clara la relación de la inversión en salud de los niños con la dificultad de medir de manera efectiva la salud de los niños a través de sus hospitalizaciones a distintas edades.

Tal como se comentó, la investigación de [Bharadwaj et al. \[2017\]](#) muestra claros y robustos resultados de cómo una mayor contaminación durante la gestación afecta de manera negativa en el SIMCE de 4° básico, por lo que, de alguna manera, la contaminación durante la gestación, que afecta en la salud de los niños al nacer pero que disipa sus efectos en la salud de los niños a medida que crecen, mantiene sus efectos negativos en el desarrollo cognitivo. Lo que podría implicar que los efectos en el desarrollo del sistema nervioso durante la

⁷La investigación de [Bharadwaj et al. \[2017\]](#) investiga sobre las cohortes de los años 90, mientras que la presente investigación utiliza las cohortes del 2004 al 2018, ambas investigaciones centradas en niños nacidos en el Gran Santiago.

gestación es afectado de manera permanente por la contaminación durante la gestación. En cambio, la salud física sería capaz de tener un *Catch Up Growth*, con una inversión suficiente en salud para que sus resultados negativos al nacer se vean dispersados, obteniendo resultados no robustos en salud al ir creciendo.

Se invita a seguir investigando al respecto de los efectos de la contaminación durante la gestación en la salud, en especial utilizando otras variables proxy de salud al ir creciendo. También se invita a observar sus efectos en el desarrollo cognitivo de los niños. Puede que las variables de salud y desarrollo del sistema nervioso se vean afectadas por la contaminación de una manera totalmente distinta: la primera teniendo la opción de mejorar a través del tiempo y la segunda siendo una características permanente en los niños, tanto en su desarrollo cognitivo como en su productividad futura, ingreso laboral y participación en el mercado laboral. Esto último representaría una urgencia de política pública para disminuir las fuentes de contaminación a las cuales las madres gestando se ven expuestas.

Referencias

- Douglas Almond, Lena Edlund, and Mårten Palme. Chernobyl's subclinical legacy: prenatal exposure to radioactive fallout and school outcomes in sweden. *The Quarterly journal of economics*, 124(4):1729–1772, 2009.
- Gabriela Aparicio, María Paula Gerardino, Marcos Rangel, Monserrat Bustelo, Luca Flabbi, Claudia Piras, Mauricio Tejada, Paolo Giordano, Kathia Michalczewsky, et al. Gender gaps in birthweight: The effects of air pollution across latin america. 2019.
- EO Arceo-Gomez, R Hanna, and P Oliva. Does the effect of pollution on infant mortality differ between developing and developed countries? evidence from mexico city. *The Economic Journal*, 2015.
- Prashant Bharadwaj, Katrine Vellesen Løken, and Christopher Neilson. Early life health interventions and academic achievement. *American Economic Review*, 103(5):1862–91, 2013.
- Prashant Bharadwaj, Matthew Gibson, Joshua Graff Zivin, and Christopher Neilson. Gray matters: Fetal pollution exposure and human capital formation. *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, 4(2):505–542, 2017.
- Sandra E Black, Aline Bütikofer, Paul J Devereux, and Kjell G Salvanes. This is only a test? long-run impacts of prenatal exposure to radioactive fallout. Technical report, National Bureau of Economic Research, 2013.
- Kenneth Y Chay and Michael Greenstone. Does air quality matter? evidence from the housing market. *Journal of political Economy*, 113(2):376–424, 2005.
- Karen Clay, Nicholas Z Muller, and Xiao Wang. Recent increases in air pollution: evidence and implications for mortality. *Review of Environmental Economics and Policy*, 15(1):154–162, 2021.
- Jane E Clougherty. A growing role for gender analysis in air pollution epidemiology. *Ciencia & saude coletiva*, 16:2221–2238, 2011.
- Cochilco. Precio de los metales, 2020. URL <https://www.cochilco.cl/Paginas/Estadisticas/Bases.aspx>. Recuperado: 2023-03-06.
- Flavio Cunha and James J Heckman. Formulating, identifying and estimating the technology of cognitive and noncognitive skill formation. *Journal of human resources*, 43(4):738–782, 2008.
- Janet Currie and Rosemary Hyson. Is the impact of health shocks cushioned by socioeconomic status? the case of low birthweight. *American Economic Review*, 89(2):245–250, 1999.
- Janet Currie and Reed Walker. Traffic congestion and infant health: Evidence from e-zpass. *American Economic Journal: Applied Economics*, 3(1):65–90, 2011.

- Evangelina Dardati, Ramiro de Elejalde, and Eugenio P Giolito. On the short-term impact of pollution: The effect of pm 2.5 on emergency room visits. 2021.
- Seremi de Salud RM. Seremi de Salud RM alertas ambientales. URL <http://www.seremisaludrm.cl/sitio/pag/aire/indexjs3airee001.asp>.
- Caroline C De Wit, Theo CJ Sas, Jan M Wit, and Wayne S Cutfield. Patterns of catch-up growth. *The Journal of pediatrics*, 162(2):415–420, 2013.
- DEIS. MinSal departamento de estadísticas e información de salud, 2021. URL <http://https://sinca.mma.gob.cl/>.
- Tatyana Deryugina, Garth Heutel, Nolan H Miller, David Molitor, and Julian Reif. The mortality and medical costs of air pollution: Evidence from changes in wind direction. *American Economic Review*, 109(12):4178–4219, 2019.
- Francesca Dominici, Lianne Sheppard, and Merlise Clyde. Health effects of air pollution: a statistical review. *International Statistical Review*, 71(2):243–276, 2003.
- David Draper. Assessment and propagation of model uncertainty. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 57(1):45–70, 1995.
- Andrew Foster, Emilio Gutierrez, and Naresh Kumar. Voluntary compliance, pollution levels, and infant mortality in mexico. *American Economic Review*, 99(2):191–97, 2009.
- Yazhen Gong, Shanjun Li, Nicholas Sanders, and Guang Shi. The mortality impact of fine particulate matter in china. *Available at SSRN 3672847*, 2020.
- Jennifer A Hoeting, David Madigan, Adrian E Raftery, and Chris T Volinsky. Bayesian model averaging: a tutorial (with comments by m. clyde, david draper and ei george, and a rejoinder by the authors. *Statistical science*, 14(4):382–417, 1999.
- Adam Isen, Maya Rossin-Slater, and W Reed Walker. Every breath you take—every dollar you’ll make: The long-term consequences of the clean air act of 1970, 2014.
- Christopher R Knittel, Douglas L Miller, and Nicholas J Sanders. Caution, drivers! children present: Traffic, pollution, and infant health. *Review of Economics and Statistics*, 98(2):350–366, 2016.
- Edward L Korn and Alice S Whittemore. Methods for analyzing panel studies of acute health effects of air pollution. *Biometrics*, pages 795–802, 1979.
- Jos Lelieveld, John S Evans, Mohammed Fnais, Despina Giannadaki, and Andrea Pozzer. The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale. *Nature*, 525(7569):367–371, 2015.

- C-Y Cynthia Lin. A spatial econometric approach to measuring pollution externalities: An application to ozone smog. *Journal of Regional Analysis & Policy*, 40(1):1–19, 2010.
- Frederick W Lipfert and Ronald E Wyzga. On the spatial and temporal variability of aerosol acidity and sulfate concentration. *Air & Waste*, 43(4):489–491, 1993.
- Enrico Moretti and Matthew Neidell. Pollution, health, and avoidance behavior: Evidence from the ports of los angeles. *Journal of human Resources*, 46(1):154–175, 2011.
- J Peter Nilsson. The long-term effects of early childhood lead exposure: Evidence from the phase-out of leaded gasoline. *Institute for Labour Market Policy Evaluation (IFAU) Work. Pap*, 2009.
- OCDE. OCDEair pollution exposure, 2019. URL <https://data.oecd.org/air/air-pollution-exposure.htm>.
- C Arden Pope, Douglas W Dockery, and Joel Schwartz. Review of epidemiological evidence of health effects of particulate air pollution. *Inhalation toxicology*, 7(1):1–18, 1995.
- Nicholas J Sanders. What doesn't kill you makes you weaker. prenatal pollution exposure and educational outcomes. *Journal of Human Resources*, 47(3):826–850, 2012.
- Nicholas J Sanders and Charles Stoecker. Where have all the young men gone? using sex ratios to measure fetal death rates. *Journal of health economics*, 41:30–45, 2015.
- Joel Schwartz. Air pollution and daily mortality in birmingham, alabama. *American journal of epidemiology*, 137(10):1136–1147, 1993.
- SINCA. MMA sistema nacional de información de calidad del aire, 2020. URL <https://sinca.mma.gob.cl/>.
- Jonathan Wakefield and Ruth Salway. A statistical framework for ecological and aggregate studies. *Journal of the Royal Statistical Society: Series A (Statistics in Society)*, 164(1):119–137, 2001.
- Meng Wang, Carrie Pistenmaa Aaron, Jaime Madrigano, Eric A Hoffman, Elsa Angelini, Jie Yang, Andrew Laine, Thomas M Vetterli, Patrick L Kinney, Paul D Sampson, et al. Association between long-term exposure to ambient air pollution and change in quantitatively assessed emphysema and lung function. *Jama*, 322(6):546–556, 2019.
- Courtney J Ward. It's an ill wind: The effect of fine particulate air pollution on respiratory hospitalizations. *Canadian Journal of Economics/Revue canadienne d'économique*, 48(5):1694–1732, 2015.
- Antonella Zanobetti, Matthew P Wand, Joel Schwartz, and Louise M Ryan. Generalized additive distributed lag models: quantifying mortality displacement. *Biostatistics*, 1(3):279–292, 2000.