



Escuela de Ingeniería
Ingeniería civil Industrial

Modelo para verificar y analizar inventarios de emisiones antropogénicas

Andrea Yovana Bulnes Espinoza

Profesor guía: Raúl Valenzuela Ruiz

Memoria para optar al título de Ingeniera civil Industrial

Rancagua, Chile

Agosto, 2023

Agradecimientos

Deseo expresar mi más profundo agradecimiento al National Laboratory for High Performance Computing Chile (NLHPC, ECM-02) por proporcionar los valiosos datos de INEMA utilizados en esta investigación. La disponibilidad de estos datos ha sido fundamental para el desarrollo y éxito de este estudio.

Índice

Resumen	4
Introducción.....	5
Hipótesis.....	7
Objetivo general	8
Objetivos específicos	8
Marco teórico	9
1.1. Conceptos claves.....	9
1.2. Bases teóricas	12
Metodología.....	15
2.1. Extracción de Datos.....	15
2.2. Modelo para la exploración y validación del inventario.....	16
2.3. Modelo para el análisis del inventario de emisiones.	19
Resultados	23
3.1. Exploración y validación del inventario.....	23
3.2. Comportamiento de las emisiones.....	26
Discusión	28
4.1. Análisis de inconsistencias.	28
4.2. Análisis del comportamiento de las emisiones.	30
Conclusiones	37
Recomendaciones	39
Referencias	41
Anexos.....	45

Resumen

Este estudio valida y analiza el inventario nacional de emisiones antropogénicas INEMA (Alamos et al., 2021), el cual contiene las emisiones de los sectores industrial, residencial, transporte y energía, este se enfoca directamente con las emisiones de MP_{10} , $MP_{2.5}$ y CO_2 .

INEMA, como el primer inventario de emisiones a nivel nacional, requiere una validación exhaustiva de las emisiones reportadas para asegurar la precisión y confiabilidad de los datos, esta validación es esencial para realizar un análisis confiable que permita verificar el cumplimiento de las normativas y regulaciones establecidas. Esto se transforma en una problemática dado que, hay un margen de error en la exactitud de los datos, es por esto que, para llevar a cabo la validación del inventario, se utilizó una metodología basada en la exploración espacial de las emisiones, creando así proyectos en QGIS con el fin de ubicar los puntos de grilla que registraban emisiones para verificar fuentes emisoras en ese punto.

Para el procesamiento de los datos se utilizó la metodología ETL. Además del lenguaje Python junto con las bibliotecas Xarray, Pandas y NumPy para la transformación del inventario, seguido de la creación de una Data Mart, finalmente se empleó la librería Matplotlib para generar visualizaciones, en cuanto a los resultados de la validación en la Región de O'Higgins revelaron algunas inconsistencias en los datos, como puntos de grilla con emisiones del sector Energía que no se presentaban en años anteriores y una distribución geográfica incorrecta de las emisiones del sector transporte y una superposición entre las zonas urbana y rural del sector residencial.

En tanto a las observaciones más relevantes sobre los valores de emisiones en la región de O'Higgins, se destaca una disminución en las emisiones de MP_{10} , y $MP_{2.5}$ en el sector energía, mientras que, en el sector Industrial se identifica un aumento en las emisiones de $MP_{2.5}$ y CO_2 , en cuanto a nivel regional, el sector transporte se destaca por tener las mayores emisiones de CO_2 , atribuible al crecimiento del parque automotriz. Por otro lado, en el sector Residencial, las emisiones de CO_2 son menores en comparación con otros sectores, a pesar de que un gran porcentaje de la población utiliza leña para calefacción.

Palabras claves: Emisiones antropogénicas, Inventario de emisiones, Material particulado

Introducción

Las emisiones antropogénicas desempeñan un papel significativo tanto en la presencia de contaminantes en el aire como en la calidad de este. Estas emisiones representan un riesgo para la salud humana, dado que, entre más altos sean los niveles de contaminación del aire mayor será la morbilidad de diversas enfermedades, como cáncer de pulmón, neumopatías como el asma, cardiovasculares, dermatológicas y otras enfermedades asociadas (EPA, 2018).

En este trabajo de investigación se valida, analiza e interpreta el inventario de emisiones antropogénicas INEMA (Álamos et al., 2022) con el fin de contrastar los resultados de la Región de O'Higgins con los Nacionales para el rango de años 2015–2017 y el año 2020.

Los contaminantes seleccionados para el estudio serán MP_{10} y $MP_{2.5}$, estas partículas son consideradas de gran relevancia para la salud, debido a que su pequeño tamaño le permite permanecer un tiempo prolongado en el aire. Estas características generan una mayor exposición a las personas y, por consiguiente, aumenta el riesgo de enfermedades asociadas. Por otra parte el material particulado también tiene efectos sobre el medio ambiente, puesto que, el viento puede transportar estas partículas largas distancias (EPA, 2018). Asimismo, también se consideran las emisiones de CO_2 por ser un gas de efecto invernadero que contribuye directamente al cambio climático (EPA, s. f.). Las emisiones de dióxido de carbono se origina tanto de fuentes naturales como de actividades humanas, sin embargo las emisiones relacionadas a las actividades industriales son las principales responsables del aumento de esta contaminante en la atmósfera (EPA, s. f.)

La estimación de estas emisiones es de suma importancia por el impacto ambiental como en la salud humana, por lo que para poder cuantificar el impacto de estos agentes contaminantes no solo es importante saber el total de emisiones a nivel nacional, si no también donde y que las producen (CR2, 2020). Cabe destacar que en la zona centro– sur del país se registran las más altas concentraciones de material particulado, superando en algunos casos la normativa vigente (Arellano, 2021).

En Chile el 12% de las muertes anuales se deben a factores ambientales modificables (INE, 2019). Es por esto que es necesario calcular la cantidad de emisiones del agente contaminante en una región determinada, como también la actividad humana o sector que lo produce.

La validación del inventario es importante para garantizar la fiabilidad y relevancia de los resultados. Esta validación asegurará que los datos recopilados y los cálculos realizados sean precisos y confiables, lo cual resultará crucial al momento de realizar el análisis de datos, permitiendo tomar decisiones informadas y desarrollar estrategias efectivas para abordar los desafíos ambientales que enfrentamos. De esta forma, este estudio busca contribuir al entendimiento de la calidad del aire de la Región de O'Higgins para así comprender y abordar el impacto ambiental de nuestras actividades.

Hipótesis

Las emisiones han sufrido un aumento en sectores como la industria, el transporte y energía en los últimos años, debido al crecimiento económico y el aumento de la población en la región de O'Higgins. Además, se espera encontrar una disminución en las emisiones del sector residencial debido a la implementación de medidas de mitigación por parte del Ministerio de Medio Ambiente, como la adopción de tecnologías más limpias en la calefacción.

Objetivo general

El objetivo general es desarrollar un método de verificación de un inventario de emisiones atmosféricas elaborado por Álamos el año 2022, para analizar e interpretar las emisiones en los sectores de transporte, industria, energía, minería y residencial enfocándose en material particulado grueso y fino (MP_{10} y $MP_{2.5}$) y dióxido de carbono (CO_2) para las emisiones de la Región de O'Higgins.

Objetivos específicos

- a) Validar el inventario de emisiones INEMA utilizando imágenes geoespaciales, con el propósito de verificar la precisión y confiabilidad de los datos obtenidos a partir de estos datos y su coherencia con las estimaciones realizadas por el inventario.
- b) Identificar la cantidad de emisiones del agente contaminante con el fin de obtener un conocimiento preciso y detallado sobre el nivel de contaminación generado por dicho agente en una determinada área.
- c) Comparar los índices de emisiones de la región de O'Higgins mediante visualizaciones, con el propósito de analizar y evaluar las diferencias y similitudes en los niveles de emisiones de contaminantes con los nacionales a través de los años 2016, 2017 y 2020.

Marco teórico

En esta sección se abordan conceptos claves para comprender la investigación, como también la recopilación de inventarios de emisiones y calidad del aire.

1.1. Conceptos claves.

Para poder comprender de mejor manera el análisis que se realiza al inventario de emisiones (Álamos et al., 2022), se definirán algunos conceptos como: inventario de emisiones, emisiones antropogénicas, contaminación atmosférica, calidad del aire dióxido de carbono y material particulado.

a) Emisiones antropogénicas

Las emisiones antropogénicas son producidas por actividades o intervenciones humanas que tienen un impacto sobre la naturaleza y la salud humana. Como la quema de combustibles fósiles, procesos industriales, actividad ganadera (*Antropogénico*, s. f.).

b) Inventario de emisiones.

Los inventarios de emisiones son un conjunto de datos que caracterizan y consolidan, mediante sumatoria, las emisiones de ciertos contaminantes atmosféricos en un área geográfica e intervalo de tiempo determinado.

c) Contaminación atmosférica

La contaminación atmosférica ocurre cuando hay una presencia de uno o más elementos en el aire, cuyas altas concentraciones o niveles que pueden constituir un riesgo a la salud de los humanos y/o a la preservación de la naturaleza.

d) Calidad del Aire

La calidad del aire es una norma, donde se establecen parámetros para la concentración de contaminantes específicos. Estos parámetros son establecidos por cada país.

e) Factor de Emisión

Es definido como un valor representativo que relaciona la cantidad de contaminante emitido a la atmósfera por una actividad asociada a emisión del contaminante.

f) Data Mart

Es un subconjunto de datos que permite acceder a ellos de manera más rápida y sencilla. Este es creado a partir de un conjunto de datos existente de datos, del cual se extrae un subconjunto temático de datos para ser procesados.

g) Visualización

En este trabajo se utiliza el termino visualización, como una visualización de datos, la cual es una representación grafica de la información y datos obtenidos.

h) Método de Extracción, transformación y carga (ETL)

El proceso de ETL consiste en combinar datos de diferentes orígenes en un gran repositorio central llamado almacenamiento de datos (Rojas,2022).

i) Dióxido de Carbono (CO_2)

El dióxido de carbono es un gas incoloro de efecto invernado, además de ser uno de los que más contribuye al calentamiento global (EPA, s. f.). Este gas es producido tanto por actividades humanas como también se produce naturalmente.

j) Material Particulado (MP_{10} y $MP_{2.5}$).

El material particulado corresponde a una mezcla de partículas sólidas y liquidas, orgánicas o inorgánicas tales como polvo, ceniza, hollín, partículas metálicas, cemento, polen, entre otras partículas dispersas en la atmosfera. Estas partículas pueden penetrar a lo largo de todo el sistema respiratorio hasta los pulmones, produciendo irritaciones o enfermedades (MMA, 2023).

Estas partículas se clasifican según su tamaño y se encuentran reguladas por la normativa primaria, la cual tiene como objetivo proteger la salud de la población Chilena.

Esta normativa engloba todos los contaminantes atmosféricos actualmente normados en Chile, donde se pueden encontrar estas dos partículas:

- **Material particulado grueso (MP_{10}):** Corresponde a las partículas cuyo diámetro aerodinámico¹ es mayor a 2,5 μm (micrómetros) y menor o igual a 10 μm . La normativa primaria de calidad de aire para material particulado grueso considera que, si las concentraciones en 24 horas de MP_{10} se encuentran dentro de los rangos de 180–229 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ se considera como alerta ambiental, entre 230–320 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ como preemergencia ambiental y niveles superiores a 330 como emergencia ambiental (*Decreto 12*, 2022).
- **Material particulado fino ($MP_{2.5}$):** Corresponde a las partículas cuyo diámetro aerodinámico es menor o igual a 2,5 μm . La norma primaria de calidad del aire establece que los niveles para material particulado fino no deben superar los veinte microgramos por metro cúbico (20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), como concentración anual, y cincuenta microgramos por metro cúbico (50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), como concentración de 24 horas (*Decreto 12*, 2022).

El monitoreo para obtener las concentraciones de este contaminante es realizado por mediciones provenientes de Estación de Monitoreo de Representatividad Poblacional (EMRP).

¹ El diámetro aerodinámico corresponde a la cantidad equivalente (Longitud) que se utiliza para describir el comportamiento de partículas sólidas o líquidas en un fluido gaseoso

1.2. Bases teóricas

Existen diferentes tipos de inventarios de emisiones a nivel global que miden las emisiones de diferentes contaminantes, los cuales buscan utilizar los mismos factores para hacerlos comparables entre ellos. Por otra parte, cada país establece normativas y/o leyes para regularizar algunas de estas emisiones.

a) Inventario de emisiones.

En esta sección se describirán algunos de los inventarios de emisiones existentes que consideren a Chile en el cálculo de las emisiones antropogénicas.

- **EDGAR:** Es una base de datos global que proporciona estimaciones de las emisiones de Gases Efecto invernado (GEI) (Crippa et al., 2021). Esta base de datos incluye los contaminantes atmosféricos de emisiones de GEI específicos de cada país y el sector que lo produce. Las estimaciones proporcionadas son realizadas bajo las directrices del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC).
- **Inventario nacional de Emisiones Antropogénicas (INEMA):** Es el primer inventario nacional de emisiones antropogénicas de alta resolución para Chile (Álamos et al., 2022). Este inventario abarca distintos contaminantes para los sectores de Transporte, Industria, Energía, Minería y Residencial para el intervalo de tiempo 2015–2017.

La metodología utilizada para crear este inventario es agrupar los 5 sectores según la clasificación del IPCC. Para obtener las emisiones de cada contaminante y su respectivo sector se realiza una ponderación del nivel de actividad total por un valor de emisión mediante la siguiente fórmula:

$$E_{iyz} = \sum_{iyz} [AL_{iyz} \cdot EF_{iz}]$$

Donde:

- E_{iyz} corresponde al total de emisiones por contaminante (i) en el año (y) en el sector (z).
- AL_{iyz} corresponde nivel de actividad del contaminante (i) en el año (y) y en el sector (z).
- EF_{iz} corresponde al factor de emisión² por tipo de especie (i) y tipo de fuente (z).

- **Evaluating the Climate and Air Quality Impacts of Short-Lived Pollutants (ECLIPSE):**

Es un Proyecto en el cual se utiliza una recopilación de datos de emisiones tanto regionales como globales. La metodología utilizada para crear la base de datos de emisiones ECLIPSE es con el modelo GAINS (Greenhouse gas – Air pollution Interactions and Synergies). Este modelo fue desarrollado por el Institute for applied Systems Analysis (IIASA).

Para estimar el consumo actual y futuro de emisiones para cada uno de los contaminantes establecidos para el estudio se utilizó la siguiente formula (Amann et al., 2011):

$$E_{i,p} = \sum_k \sum_m A_{i,k} ef_{i,k,m,p} X_{i,k,m,p}$$

Donde:

- i, k, m, p corresponde al País (i), tipo de actividad (k), medida de reducción (m) y contaminante (p).
- $A_{i,k}$ Corresponde al nivel de actividad del tipo (k) y en el país (i).
- $ef_{i,k,m,p}$ Corresponde al factor de contaminación (p) para la actividad (k) en el país (i) después de la aplicación de la medida de control (m).

² El factor de emisión se obtiene de European Environment Agency (European Environment Agency., 2019)

- $X_{i,k,m,p}$ Corresponde al porcentaje de la actividad del tipo (k), en el país (i) al que se aplica la medida de control (m) para el contaminante (p).

b) Contaminación atmosférica y Calidad del Aire

Esta sección proporciona contexto y referencias clave relacionadas con la contaminación atmosférica y la calidad del aire, lo cual es fundamental para comprender la labor de las instituciones dedicadas a su estudio y las recomendaciones internacionales que guían las acciones en este campo.

- **Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA):** Este sistema recopila datos de las concentraciones ambientales de los contaminantes atmosféricos actualmente normados en Chile (SINCA, s. f.) y poseen 205 estaciones de monitoreo en todo el país.
- **WHO global air quality guideline:** La Organización Mundial de la Salud (OMS) como entidad internacional dedicada a la salud de las personas se encarga de realizar estudios para establecer estándares sugeridos para la calidad del aire, sin embargo, cada país es libre de establecer o no estándares. En el continente americano, el cual posee 35 países, solo el 57% de estos ha adoptado las recomendaciones de OMS para al menos uno de los contaminantes y si esto se lleva a nivel global tan solo el 60% de los países lo ha incorporado (World Health Organization, (OMS), 2021)

Metodología

En esta sección, se detalla el modelo para la validación y análisis del inventario de emisiones INEMA.

En el desarrollo de este trabajo, se ha optado por la utilización del modelo ETL (Extracción, Transformación y Carga) para llevar a cabo la gestión de datos de manera eficiente y efectiva. Este enfoque nos permite abordar la recopilación, transformación y carga de información proveniente de diversas fuentes de manera sistemática y organizada.

El primer punto de esta sección se refiere a la extracción de los datos, ya que esta acción es previa tanto a la validación como al análisis. La obtención de los datos constituye el primer paso fundamental para asegurar la disponibilidad y calidad de la información necesaria en todo el proceso, el segundo punto corresponde al modelo para la validación del inventario INEMA y el ultimo corresponde al modelo para el análisis del inventario.

2.1. Extracción de Datos

Los datos son extraídos de dos fuentes, para posteriormente integrarlas en una sola base de datos, para simplificar su análisis. Para la extracción de datos se utilizaron las siguientes fuentes:

a) Zenodo

Los datos utilizados en un comienzo fueron los otorgados por el inventario INEMA, los cuales se encuentran disponibles a través de Zenodo (Álamos et al., 2021) . Esta versión del inventario solo contiene datos para los años 2015 a 2017 y contempla los sectores de Energía, Transporte, Minería, Residencial e Industria.

b) Conversación directa

Se encuentra en proceso de elaboración una nueva versión del inventario de emisiones del cual comparten las emisiones correspondientes al año 2020, esta versión realiza una reasignación de los sectores, donde el sector minería se engloba en el sector industrial y se agregan los sectores de quema agrícola e incendios forestales. Esta nueva

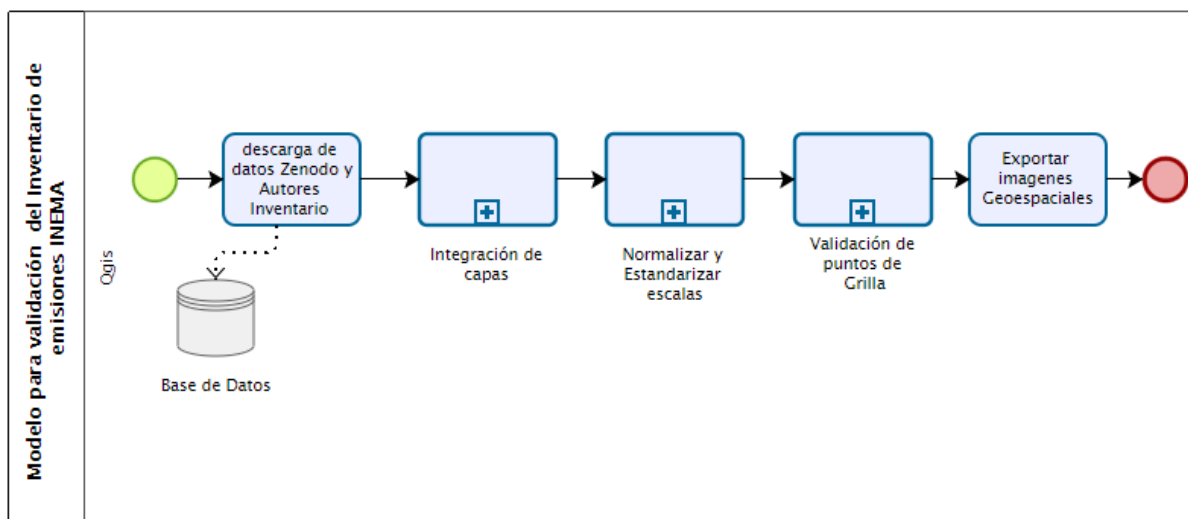
versión catalogada como INEMA 2.0 al estar en desarrollo se obtuvieron los datos directamente de los autores. Junto con esto también se obtuvieron tablas de valores referenciales para los contaminantes MP_{10} y $MP_{2.5}$ entre los años 2015 a 2017.

2.2. Modelo para la exploración y validación del inventario.

En este apartado se describen los pasos realizados para la exploración espacial de los datos de INEMA. A través de la exploración espacial, se pueden identificar los puntos de grilla importantes que son clave para la validación. Esta exploración permite descubrir patrones espaciales y detectar anomalías.

La figura que se presenta y su respectiva descripción muestra el proceso general del modelo para la exploración y validación del inventario de emisiones INEMA, el detalle de cada uno de los subprocessos se presenta de manera independiente en los *anexo 1*, *anexo 2* y *anexo 3* y los subprocessos correspondientes a la validación de cada sector se encuentran en los *anexos del 6 al 10*.

Figura 1: *Flujograma modelo para validación del inventario de emisiones INEMA.*



Fuente: Elaboración propia

a) Integración de capas

Para la exploración y validación del inventario se identificó espacialmente cada punto de grilla que contenía emisiones, para esto se utilizó el software QGIS, integrando un modelo de capas tanto de Google Earth (Capa Base), de las emisiones de INEMA (Capa Raster) en formato de archivo NetCDF y la división política administrativa (Capa Vectorial). Esta última corresponde a la división política administrativa del año 2020, dada por la Subsecretaria de Desarrollo Regional y Administrativo.

Se realizó un total de 20 proyectos en QGIS, cada sector se dividió en los 3 años que se utilizarán en esta investigación, y cada uno de estos proyectos contiene los 3 contaminantes a comparar.

En primer lugar, se utilizó un mapa como capa base. QGIS permite añadir el servicio de mapas de Google Maps, el cual se obtiene mediante el uso del plugin QuickMapServices, en segundo lugar, se agregó una capa vectorial correspondiente a la división política administrativa de Chile para el año 2020, en este caso se utilizó la división por regiones. Por último, se agregó una capa ráster correspondiente a las emisiones en una grilla de $0.01^\circ \times 0.01^\circ$ (aproximadamente $1\text{km} \times 1\text{km}$).

b) Normalizar y Estandarizar escalas:

Se normalizaron y estandarizaron los valores por punto de grilla de cada uno de los contaminantes y sectores, dado que cada sector presentaba una rango de valores diferentes para detallar la concentración de emisiones en un punto de grilla, por lo que se otorgó un rango entre $[0 \text{ y } 0,001 \frac{\text{Kton}}{\text{years}}]$ para cada cuadrícula, así poder comparar las emisiones según el sector. Además, se asigna una escala de color para cada uno de los contaminantes, donde el color verde corresponde a $MP_{2.5}$, el azul a MP_{10} y el rojo a CO_2 .

c) Validación de puntos de grilla

Se buscaron inconsistencias en el inventario de emisiones para cada uno de los proyectos realizados en QGIS de la siguiente manera:

- **Sector de transporte:** Se verifico que cada punto de grilla que contiene emisiones se encontrase tanto en carreteras o vías urbanas.
- **Sector residencial:** Este sector viene dividido en dos sectores, urbano y rural por separado. Para la validación se utilizó La Ficha Regional de O'Higgins creada por la Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA) la cual clasifica las comunas tanto en Urbana, Rural o Mixta.

Para la validación primero se superpusieron las capas de rural y urbano para verificar que las zonas urbanas calzaran en los espacios que no contenían emisiones en la capa de rural. Posteriormente se verifico que el sector correspondiera a la clasificación de la ODEPA, para esto los catalogados como Mixto se tomaron como Urbano.

- **Sector de minería:** Este sector abarca la fundición y producciones de metales, por lo que se ubicaron los puntos de grilla que presentaban emisiones y con sus coordenadas se localizaron los puntos en Google Maps para verificar la existencia de alguna fundición. Por otra parte, para las mineras se confirmó su ubicación buscando las coordenadas geográficas de estas.
- **Sector industrial:** Para la validación del sector Industrial se utilizaron los datos otorgador por el Registro de Emisiones y Transferencias de Contaminantes (RETC), es cual es una base de datos de acceso al público que posee las emisiones de contaminantes potencialmente dañinos para la salud y la calidad del aire, generadas por actividades industriales o no industriales.

Esta base de datos esta corresponde a una tabla elaborada en Excel, por lo que para su manipulación se seleccionaron los datos relevantes, que incluyen el nombre establecimiento, rubro, el contaminante, la emisión en toneladas, el año, la región, la provincia, la comuna, el huso, coordenada norte y coordenada este. Esto permite una manipulación más precisa y enfocada en los datos específicos necesarios para la validación.

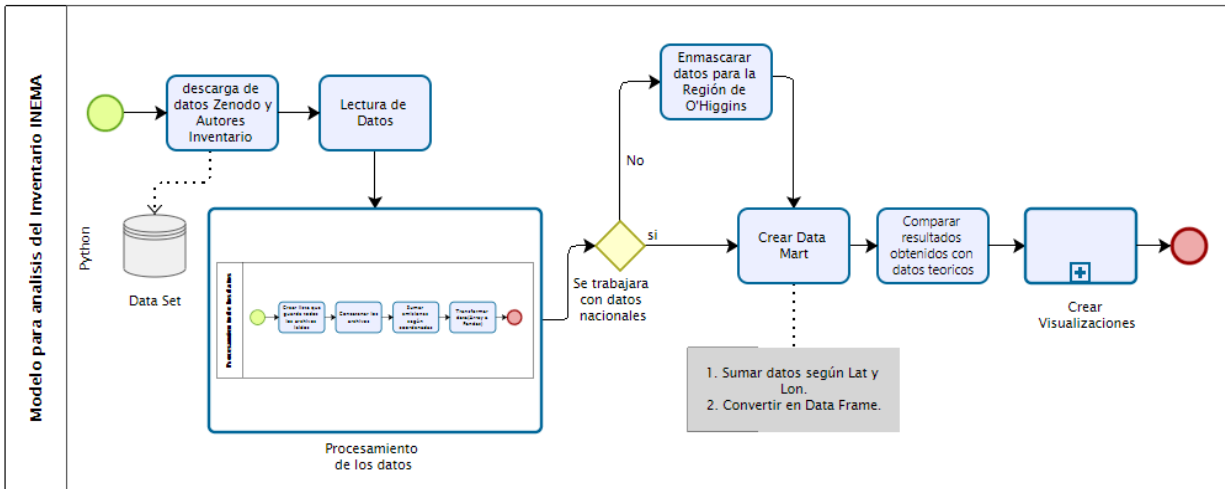
Se aplicó un filtro basado en las comunas y los contaminantes específicos. Luego, se realizó una búsqueda en el proyecto desarrollado en QGIS para determinar si existían emisiones en el punto de grilla correspondiente a las coordenadas seleccionadas. Es importante mencionar que, en esta área en particular, se requirió ajustar el huso en los proyectos de QGIS, ya que variaba entre 18 y 19 en la base de datos. Esta modificación del huso fue necesaria para asegurar la precisión y consistencia de los datos geográficos durante el proceso de validación.

- **Sector energía:** Para este sector se buscó la ubicación de las distintas generadoras de energía, utilizando la información proporcionada por Enel sobre la ubicación de sus centrales eléctricas además de la información proporcionada por Generadoras de Chile, la cual es la agrupación de las principales empresas de energías renovables de Chile. Al mismo tiempo se validaron los datos auto informados en el Registro de Emisiones y Transferencias de Contaminantes (RETC) por las generadoras de energía

2.3. Modelo para el análisis del inventario de emisiones.

La figura que se presenta y su respectiva descripción muestra el proceso general del modelo para el análisis del inventario de emisiones INEMA, el detalle de cada uno de los subprocesos se presenta de manera independiente en los *anexo 4* y *anexo 5*.

Figura 2: *Flujograma modelo para análisis del inventario de emisiones INEMA.*



fuentes: Elaboración propia

Al trabajar con niveles de concentración de contaminantes el tipo de archivo donde se almacenan los datos tiene formato de NetCDF. Este tipo de datos se encuentran estructurados en arreglos numéricos con dimensiones de longitud y latitud.

Para el procesamiento del inventario, se utilizó el lenguaje de programación Python junto con las librerías Xarray, Pandas y Matplotlib. Xarray fue empleada debido a su capacidad de análisis y manipulación de datos multidimensionales, lo cual resulta especialmente útil para trabajar con datos geoespaciales en formato de arreglo o matriz. Por su parte, Pandas desempeñó un papel fundamental en el análisis de los datos, ya que su amplio conjunto de funciones y métodos permitió llevar a cabo tareas como limpieza, transformación, filtrado y cálculo de estadísticas descriptivas. Además, la integración fluida de Pandas con otras bibliotecas, como NumPy y Matplotlib, facilitó la realización de análisis más complejos y la creación de visualizaciones personalizadas. Matplotlib, en particular, ofrece una amplia variedad de gráficos y opciones de personalización, permitiendo controlar los detalles visuales de las visualizaciones, como estilos de línea, colores y etiquetas de ejes.

a) Lectura de datos

Para la lectura de los archivos se utilizó un Path que busque todos los archivos correspondientes a un contaminante con un respectivo sector y los agrega a una lista (*Ver anexo 11 para pseudocódigo*).

b) Transformación de los datos

Una vez extraídos los datos, comienza la etapa de transformación. Aquí, se llevan a cabo diversas operaciones para homogeneizar la información. Los datos se someten a procesos de limpieza, normalización y normalización de nombres y categorías.

Para el procesamiento de los datos se creó una lista que guarde todos los años seleccionados para el respectivo contaminante, para luego unir los arreglos mediante la función concat (*Ver anexo 12 para pseudocódigo*).

c) Carga (Data Mart)

Para el cálculo de las emisiones por punto de grilla, se sumaron según las coordenadas que se encontraban, para luego transformar la data de array a dataframe con la finalidad de poder utilizar Pandas para su manipulación (*Ver anexo 13 para pseudocódigo*).

Esto se realizó para cada uno de los contaminantes y sectores que se estudiaran, finalmente tras completar la transformación de los datos, se procedió a la creación de Data Mart específica para cada contaminante.

d) Crear visualizaciones

Para abastecer al modelo de visualizaciones. Estas fueron realizadas con Pandas y la librería matplotlib (*Ver anexo 14 para pseudocódigo*).

Para el sector Industria se tuvo que realizar un paso más allá dado que para el año 2020 este sector engloba el sector de minería, por lo que para el cálculo de las emisiones para los años 2016 y 2017 se tuvieron que sumar las emisiones de estos 2 sectores obteniendo

un nuevo arreglo numérico para dicho sector. Luego se trabajó sobre este nuevo arreglo, realizando los mismos pasos que para el resto de los sectores.

e) Comparación de resultados

Se llevaron a cabo comparaciones de los resultados obtenidos tanto a nivel nacional como a nivel regional, con los resultados de referencia proporcionada directamente por los autores. Sin embargo, es importante tener en cuenta que estos resultados son aproximados a lo teórico debido a ciertas limitaciones o factores que podrían influir en la precisión de los datos (*ver anexo 28*).

f) Enmascarar datos para la Región de O'Higgins

El cálculo de las emisiones a nivel regional se realizó de la misma forma, sin embargo, antes de realizar la suma de las emisiones se establecen los límites de las coordenadas regionales (*Ver anexo 15 para pseudocódigo*).

Resultados

En esta sección se expondrán los resultados obtenidos tanto en la validación espacial del inventario como también de las visualizaciones obtenidas. Los datos utilizados fueron los años 2016, 2017 y 2020 dejando fuera el año 2015 dado que, este presentaba problemas de escala en la sumatoria de emisiones por punto de grilla a pesar de encontrarse en las mismas unidades de medida que los años restantes (*ver tabla 1*). Este problema solo se presentaba en los sectores de energía, industria y minería, sin embargo, se decidió no utilizar este año para la totalidad de los sectores así comparar año a año en las mismas condiciones.

Tabla 1: *Tabla de emisiones Nacionales del año 2015 al 2017 (kton/año)*

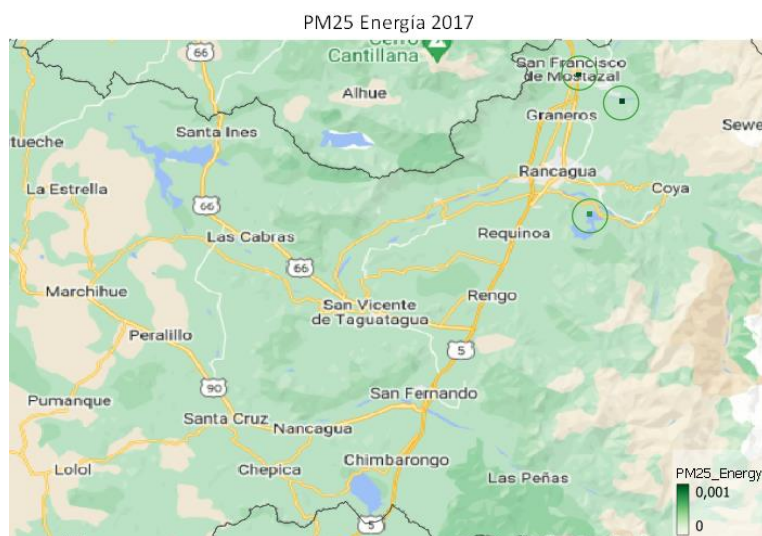
		PM2.5	PM10	CO2
Residencial	2015	168,2	180,6	14474,4
	2016	168,3	180,9	14491,7
	2017	168,6	181,1	14509,7
Energía	2015	98.297.230	125.079.100	1.225.267.000
	2016	4,4	5,0	33784,8
	2017	3,4	3,5	30683,4
Transporte	2015	2,3	2,5	22041,3
	2016	2,2	2,4	22960,3
	2017	2,3	2,5	24583,9
Industria	2015	143.033.310	160.287.630	2.788.492.100
	2016	4,3	11,3	11590,6
	2017	5,9	8,8	20624,0

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de INEMA.

3.1. Exploración y validación del inventario.

A continuación, se presentan las imágenes espaciales de la región de O'Higgins para el sector energía del año 2017. El restante de los años se puede encontrar desde el *anexo 16* al *anexo 25*. Para el sector de Energía e Industria se marcaron con circunferencias los puntos de emisiones que son escasos para una mejor visualización de estas.

Figura 3: *Distribución espacial de emisiones de MP25 del sector energía para el año 2017*
(kton/año)



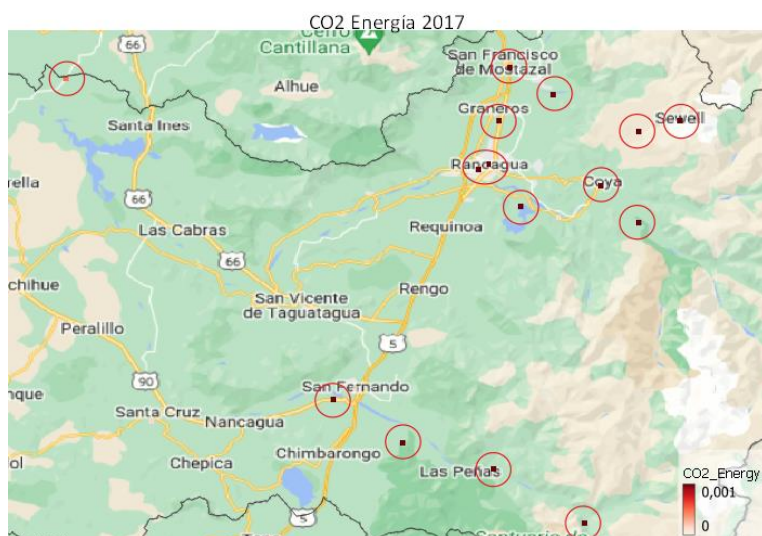
Fuente: Elaboración propia

Figura 4: *Distribución espacial de emisiones de MP10 del sector energía para el año 2017*
(kton/año)



Fuente: Elaboración propia

Figura 5: *Distribución espacial de emisiones de CO₂ del sector Energía para el año 2017 (kton/año)*



Fuente: Elaboración propia

Al observar las figuras correspondientes al sector Energía (*ver de figura 3 a la figura 5*) y los anexos relacionados a este sector (*ver del anexo 16 al 19*) correspondientes a los años 2016 y 2020 para el sector Energía, se puede apreciar que existe una disminución en los puntos de grilla que contienen emisiones para los tres contaminantes. Para este sector cada punto de grilla que presenta emisiones corresponde a generadoras de energías. Para el contaminante CO_2 del año 2017 se aprecia un punto de grilla con emisiones que no se observan en los otros años. Para este sector no se presentaron emisiones de MP_{10} y $MP_{2,5}$ para el año 2020.

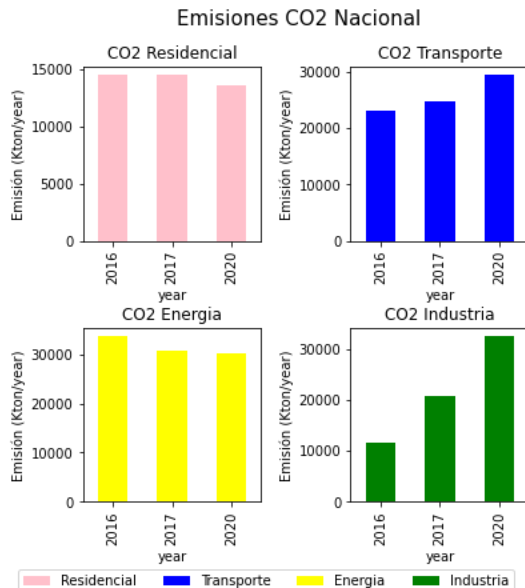
Para el sector Industrial se puede apreciar un notable aumento en los niveles de CO_2 desde el año 2016 al 2020 (*ver anexo 20, anexos 21 y anexo 22*). Al igual que para el sector de transporte en el año 2020 (*ver anexo 25*).

Por último, para el Sector Transporte no presenta emisiones de MP_{10} y $MP_{2,5}$ para los años 2016 y 2017.

3.2. Comportamiento de las emisiones.

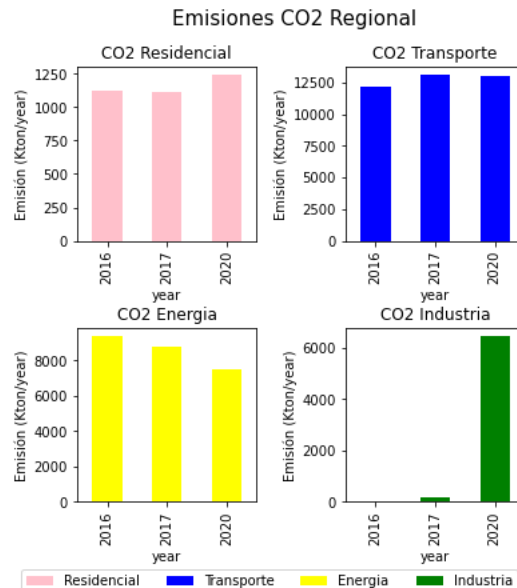
En esta sección se presentan las visualizaciones correspondiente al total de emisiones para cada año en sus respectivos sectores.

Figura 6: Emisiones de CO2 a nivel Nacional.



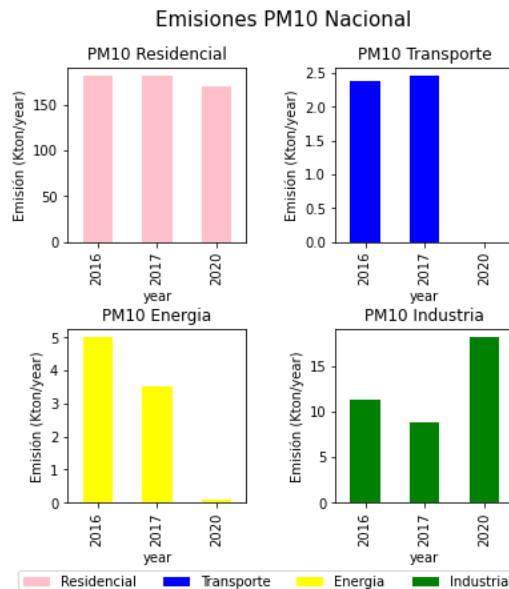
Fuente: Elaboración propia

Figura 7: Emisiones de CO2 a nivel Regional.



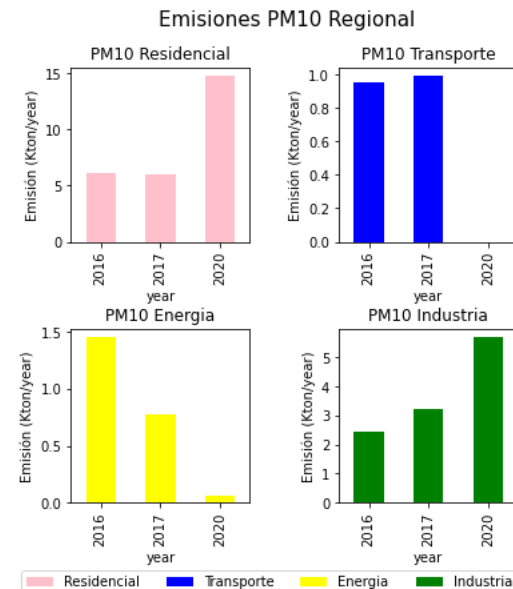
Fuente: Elaboración propia

Figura 8: Emisiones de MP10 a nivel Nacional.



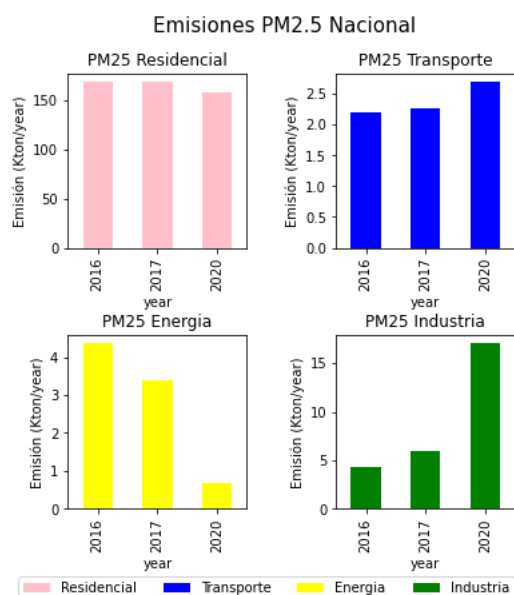
Fuente: Elaboración propia

Figura 9: Emisiones de MP10 a nivel Regional.



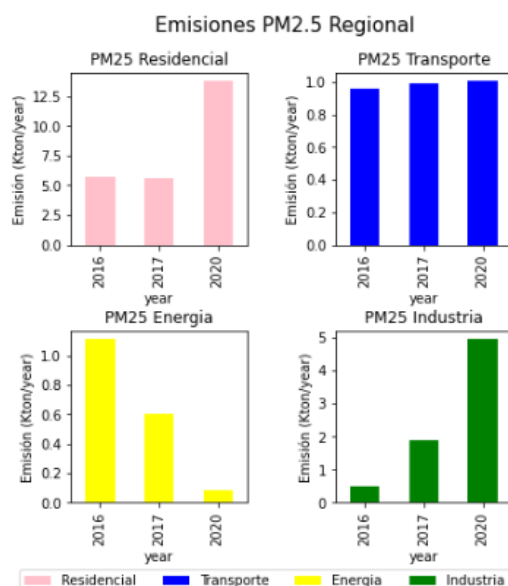
Fuente: Elaboración propia

Figura 10: Emisiones de MP2.5 a nivel Nacional.



Fuente: Elaboración propia

Figura 11: Emisiones de MP2.5 a nivel Regional.



Fuente: Elaboración propia

De la *figura 6* se puede apreciar que el sector Residencial es el que menores índices de CO_2 presenta a nivel nacional, sin embargo, a nivel regional no ocurre esto (*ver figura 7*), ya que, este sector es el segundo en generar más emisiones a nivel regional con respecto a este contaminante.

Con respecto a MP_{10} El sector Residencial (*ver figura 8*) es el que mayor concentraciones presenta y esto se repite a nivel regional (*ver figura 9*), esto también ocurre con $MP_{2.5}$.

Discusión

En esta sección se analizarán los datos obtenidos tanto en la validación del inventario como los obtenidos al crear la data Mart y posteriormente las visualizaciones.

4.1. Análisis de inconsistencias.

De los resultados obtenidos al realizar la validación del inventario se encontraron las siguientes inconsistencias:

En el caso de Energía se puede observar que en el año 2017 hay un punto de grilla de CO_2 con emisiones que en los otros años no se presentan, el cual corresponde a el punto de grilla entre San Fernando y Las Peñas. Al revisar la existencia de estas coordenadas en el Registro De Emisiones y Transferencias de Contaminantes (RETC, s. f.) del año 2017 no existe fuentes puntuales en esta ubicación que reportaran sus emisiones, por lo que este punto de grilla se considera una inconsistencia. Para corroborar esta información se buscó una fuente de energía dentro de las generadoras de energía existentes en la región, sin embargo, no se encontró información de una central eléctrica en esta ubicación.

Para este sector en particular, se ha identificado otra inconsistencia con relación a los valores MP_{10} y $MP_{2,5}$ para el año 2020. Se ha observado que durante dicho año no se registraron emisiones en la región de O'Higgins para estos contaminantes. Al verificar los datos en RETC para el año 2020, se constató que no se reportaron emisiones de estos contaminantes por parte de las generadoras de energía en esta categoría. Esto se debe a que las emisiones de este sector son auto declaradas y, en este caso en particular, no se realizaron reportes de emisiones para el mencionado año y región.

En el sector de Transporte se encontró una gran inconsistencia con la geolocalización de las emisiones. Si se observa el *anexo 25* correspondiente a las emisiones de CO_2 para el año 2020 existe un variación en la intensidad de las emisiones en comparación con los años 2016 y 2017 (*ver anexo 22 y 23 respectivamente*), lo que se da a entender que para el año 2020 las emisiones no se encuentran correctamente distribuidas en sus puntos de grilla correspondientes.

Por último, para el sector residencial se encontró una superposición entre la capa de urbano y rural, es decir, hay puntos de grillas que se comparten para estas dos zonas, esto ocurre en las siguientes comunas:

Tabla 2: *Comunas que presentan inconsistencias para el rector residencial.*

Comuna	Comuna	Comuna
Chépica	Huique	Olivar bajo
Codegua	La estrella	Paredones
Cunaco	Las cabras	Peralillo
Doñihue	Litueche	Peumo
El manzano	Lolol	Pichilemu
El Sauce	Nancagua	Placilla

Fuente: Elaboración propia con los resultados obtenidos de INEMA.

En relación con el sector del Transporte, al analizar las imágenes geoespaciales de los contaminantes MP_{10} y $MP_{2,5}$, no se detectan puntos de grillas que indiquen la presencia de emisiones. Sin embargo, al ajustar el rango de valores en la gráfica, es posible visualizar las emisiones (*ver anexos 30 al 33*) aunque sean mínimas. Esto se debe a que, al utilizar una escala normalizada y estandarizada, las emisiones de estos contaminantes resultan demasiado pequeñas para ser percibidas a simple vista.

4.2. Análisis del comportamiento de las emisiones.

De acuerdo con los resultados obtenidos desde la *figura 6* hasta la *figura 11* se puede analizar el comportamiento de las emisiones para los diferentes sectores a trabajar. Con respecto al sector Energía existe una disminución en las emisiones para los 3 contaminantes abordados, esto puede ser debido a que el Plan de Acción Regional de Cambio Climático para la Región de O'Higgins (E2BIZ, 2020) consiste en disminuir porcentaje de generación energética, proveniente de petróleo diésel, gas natural y GNL, que tiene emisiones de GEI asociadas.

Tabla 3: *Generación Bruta de Electricidad (% y MWh) según tecnología, período 2010–2017, Región de O'Higgins*

Tecnología	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Biomasa	-	1,8%	4,6%	3,1%	4,2%	3,3%	2,5%	4,2%
Eólica	-	-	-	0,7%	1,1%	1,6%	1,2%	1,6%
Gas Natural	5,3%	0,6%	-	-	-	-	-	-
GNL	0,8%	17,4%	-	5,5%	0,1%	0,3%	4,3%	3,9%
Hidráulica Embalse	32,9%	18,2%	29,2%	15,7%	18,5%	20,2%	20,6%	21,2%
Hidráulica Pasada	52,6%	51,4%	56,9%	66,4%	74,4%	73,1%	68,6%	65,8%
Petróleo Diesel	8,4%	10,5%	9,3%	8,7%	1,7%	1,6%	2,7%	3,1%
Solar	-	-	-	-	-	0,1%	0,2%	0,2%
Total	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Total (MWh)	1.429.481	1.842.200	2.175.748	2.507.903	2.598.067	2.876.370	3.478.240	2.941.156

Fuente: Plan de Acción Regional de Cambio Climático–Región de O'Higgins (E2BIZ, 2020)

Podemos respaldar la información anteriormente descrita con la *Tabla 3*, donde se puede observar que al transcurso de los años se genera un aumento de 3,79% a 5,07% en el porcentaje de generación de electricidad con energías renovables como biomasa, eólica y solar lo que conlleva una menor emisión de CO_2 .

En cuanto al sector Industrial, se puede observar que es el segundo sector con mayores índices de emisiones en Material Particulado Fino y Grueso a nivel nacional como a nivel regional. Este resultado a nivel regional es consistente con las principales actividades industriales de la región: agrícola, industria de alimentos y la minería. Este último es uno de los principales actividades asociadas a las emisiones de $PM_{2.5}$ y PM_{10} . Sin embargo, existe un

aumento de material particulado fino entre estos años a pesar de estar regulado y ser nocivo para la salud humana, por lo que la fiscalización de las emisiones de material particulado en la industria es de gran importancia.

En cuanto al CO_2 , este predomina en emisiones en el sector Industrial. Estos resultados concuerdan con las principales actividades de la Región de O'Higgins dado que el sector agrícola y la industria de alimentos producen un volumen significativo de Gases de efecto invernadero (Xu et al., 2021), lo que conlleva a una gran producción de dióxido de carbono. Cabe destacar que dentro de la Región de O'Higgins se encuentran grandes empresas destinadas a estos rubros, siendo una de ellas dedicada a los alimentos de origen animal (Agrosuper). Por último, un estudio realizado por la revista Nature Food, indica que la Industria de origen animal genera alrededor de un 57% de emisiones de GEIs a nivel global (Escudero et al., 2022).

De acuerdo con lo propuesto por el Plan de Acción Regional de Cambio Climático-Región de O'Higgins (E2BIZ, 2020) se tiene el objetivo de reducir las emisiones del sector industrial mediante la sustitución de combustibles altamente emisores a gas natural en los consumos térmicos, dado que este último es considerado un combustible limpio, es decir generan una menor cantidad de emisiones contaminantes.

Con respecto al año 2020 se puede observar un aumento de las emisiones de los tres contaminantes, esto se debe a que para este año se toman en cuenta un mayor número de rubros industriales, por lo que tendría sentido el aumento significativo en el total de ellas.

El sector Transporte es el sector con mayor emisiones de Dióxido de Carbono a nivel regional, esto ocurre debido a que la combustión de combustibles fósiles como petróleo y gas natural son la actividad humana principal en la emisión de CO_2 . Por otra parte, es la segunda fuente de mayor emisión a nivel nacional, esto se debe a que en la zona norte del país hay una abundancia de termoeléctricas, las cuales producen una cantidad considerable de Dióxido de Carbono.

En la Región de O'Higgins el parque automotriz ha ido en aumento año a año, lo que se puede observar en la *tabla 4*, ya que, para el periodo 2016–2017 hubo un aumento de aproximadamente un 7% en el total de vehículos nuevos a nivel regional. Esto es consistente con el aumento en las emisiones de transporte para la región.

Tabla 4: *Parque de Vehículos Región de O'Higgins, período 2010–2017*

Categoría	Subcategoría	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Transporte Particular y otros	Automóvil, <i>Stación Wagon</i>	97.276	107.172	119.114	127.039	137.866	147.010	157.739	173.133
	Camioneta	38.688	40.986	44.511	46.173	48.975	51.601	55.981	59.921
	Otros	19.291	20.618	24.636	25.069	27.603	29.079	29.792	31.027
Transporte Colectivo	Taxi colectivo	4.523	4.519	4.469	4.462	4.494	4.571	4.676	4.590
	Bus Transporte Colectivo	3.878	3.589	3.882	3.411	3.329	3.160	3.207	3.161
	Minibús, Transporte Colectivo	1.820	1.607	772	760	848	948	1.524	1.804
	Otros	1.778	1.888	1.951	2.090	2.043	2.103	2.639	2.504
Transporte de Carga	Camión Simple	8.860	9.414	10.062	8.904	9.647	10.140	10.158	10.483
	Remolque y Semirremolque	4.224	4.675	4.937	4.439	4.727	4.860	5.061	5.209
	Tractocamión	2.098	2.476	2.686	2.381	2.458	2.619	2.840	3.026
	Otros	1.985	2.182	2.304	2.162	2.379	2.473	2.238	2.390
Total		184.421	199.126	219.324	226.890	244.369	258.564	275.855	297.248
Variación anual		108,9%	108,0%	110,1%	103,4%	107,7%	105,8%	106,7%	107,8%

Fuente: Plan de Acción Regional de Cambio Climático–Región de O'Higgins (E2BIZ, 2020)

El aumento del parque automotriz de la región aumenta a pesar de que el crecimiento económico y poblacional de la región son bajos, ya que según las proyecciones de población del INE realizadas para el periodo 2002–2020 (*Ver anexo 29*) la población creció solo 1% entre los años 2016 y 2017. Además de considerar que el producto interno bruto de la región tuvo una variación negativa de un –0,01% entre estos años (*ver anexo 34*).

Por otro lado, en la región no existe restricción de circulación para el parque automotriz más antiguo. Según un estudio realizado por el Ministerio del Medio Ambiente, los automóviles con 10 años de uso contaminan 20 veces más un auto nuevo (MMA, 2015). Además, la prohibición de circulación para vehículos no catalíticos solo rige para la Región

Metropolitana, por lo que en la región de O'Higgins si pueden circular, lo cual provoca un mayor índice de material particulado fino.

Según información de la Asociación Nacional Automotriz de Chile (ANAC), la edad promedio del parque automotriz en Chile es de alrededor de 10 años para el año 2016 (ANAC, 2017). Sin embargo, cabe destacar que esta cifra puede variar dependiendo de la región y del tipo de vehículo. La información del estudio mencionado sugiere que la edad promedio de los vehículos en la Región de O'Higgins en Chile es de 11,4 años (ANAC, 2017) (*Ver anexo 26*). Esto significa que la mayoría de los vehículos en circulación en la región tienen más de una década de antigüedad por lo que contaminan alrededor de 10 veces más. El estudio se basó en una muestra representativa de vehículos y utilizó una metodología de estimación para obtener los resultados.

Con respecto a este sector el Plan de Acción Regional de Cambio Climático-Región de O'Higgins (E2BIZ, 2020) establece reducir las emisiones de camiones mineros de la fase mina del proceso productivo de la gran minería del cobre mediante la introducción de camiones cero emisión, llegando a un 80% en 2050 de camiones de la minería cero emisiones, lo que es considerable ya que en la región el 7,5% de las emisiones de CO_2 corresponde a este sector.

Por otro lado, el Gobierno Regional financiara el Programa Mi Colectivo Eléctrico el cual comenzó a finales del 2022 y apunta a potenciar el recambio de 175 colectivos a tecnología 100% eléctrica dentro de la región (Ministerio de Energía, 2022) no es suficiente para la cantidad de colectivos existentes en la región de O'Higgins. Sin embargo, esta iniciativa es un comienzo en la región para abordar la cantidad de emisiones que se emiten por el transporte. Además, el decreto publicado el 23 de marzo del 2023, aborda el control de emisiones del transporte en el cual se plantea el Programada De Renovación de Buses, el cual establece la Renovación de Buses, Minibuses, Trolebuses y Taxibuses que cumplan con las normas de eficiencia energética, sean estos vehículos eléctricos o bien que cumplan con estándar red (*Decreto 1*, 2023).

Por último, el sector Residencial en la región presenta los menores índices de emisión de Dióxido de carbono en comparación con los otros sectores de estudio, lo que es contradictorio con el hecho a nivel nacional, dado que para este último la concentración de CO_2 es bastante mayor en comparación con el resto de los sectores. Esto se debe a que para este sector solo se toma en cuenta las emisiones por combustión a leña, ya sea para calefacción, cocinas o duchas.

Nacionalmente la macrozona sur del país es la más afectada por este tipo de contaminantes dado que representa un gran porcentaje de estas emisiones a nivel nacional, por el uso de leña para calefacción, cocina y agua caliente sanitaria. En cambio, en la región de O'Higgins su principal uso al año 2017 era para calefacción, donde se estima que un 47% de la población utiliza este tipo de calefacción y solo un 2% lo utiliza para cocinar (*anexo 27*).

La combustión a leña emite una cantidad considerable de Material particulado fino y grueso, eso se debe al uso de leña que no se encuentra certificada. Esta certificación garantiza que la leña se encuentre seca (menor a 25% de humedad), lo que permite una mayor eficiencia en la combustión y menores emisiones de contaminantes (SERNAC, 2007). Cuando la leña se encuentra húmeda, gran parte de la energía provocada por la combustión se utiliza para secarla y este proceso genera emisiones de Material Particulado fino (Diario y Radio Universidad Chile, 2011).

En el sector mencionado, se encuentra en marcha un plan de mitigación que busca reducir las emisiones generadas por el mismo. El Ministerio del Medio Ambiente implementó un Plan Descontaminación Atmosférica (PDA) en el cual se encuentra el programa de recambio de calefactores. Este tiene como objetivo disminuir las emisiones de contaminantes derivadas de la combustión de leña (MMA, s. f.). Esta iniciativa busca promover la adopción de tecnologías más limpias y eficientes en el sistema de calefacción, contribuyendo así a mejorar la calidad del aire y reducir el impacto ambiental asociado a esta actividad. Este plan va de la mano con el subsidio de acondicionamiento térmico implementado por el MINVU ya que, el

acondicionamiento permite disminuir el consumo de combustibles utilizados para calefactar (MINVU, 2018).

El PDA de recambio de calefactores abarca desde el año 2012 al año 2022 con una meta de 12.000 recambios de calefactores para la región de O'Higgins como se puede observar en la *tabla 5*, sin embargo, como se mencionó anteriormente el 47% de la población de la región utiliza calefacción por combustión de leña por lo que solo un 3,4%³ de la población que utiliza calefacción será beneficiada.

Cabe mencionar que este plan es financiado en conjunto por el Ministerio del Medio Ambiente y los Gobiernos Regionales (GORE). Durante período 2014–2017 el 71% de los recursos han sido aportados por el MMA y el 29% por los GORE además de un copago por parte de los beneficiados que hasta el año 2017 no supero los \$130.000 (Zaviezo, 2019).

Tabla 5: Total, recambios de calefactores que contribuyen a la meta del PDA

Cuenta PDA	2015	2016	2017	Total	Meta	% Avance	Años Transcurri
Valle Central O'Higgins	0	1.063	213	1.276	12.000	10,6%	5/10
Talca y Maule	356	350	1.300	2.006	13.000	15,4%	2/10
Chillán y Chillán Viejo	0	218	499	717	20.000	3,6%	2/8
Temuco y Padre de las Casas	574	1.686	1.538	3.798	37.000	10,3%	3/5
Valdivia	0	0	265	265	26.000	1,0%	1/8
Osorno	0	1.085	886	1.971	25.000	7,9%	2/10
Coyhaique	68	1.035	1.690	2.793	10.000	27,9%	2/10
Total	998	5.437	6.391	12.826	143.000	9,0%	

Fuente: Documento de Recambios Históricos MMA (Zaviezo, 2019)

La implementación del este PDA no se ve reflejado en el periodo 2016–2017 ya que se mantienen las concentraciones de los 3 contaminantes porque durante estos años solo se concretaron 1.276 recambios sin embargo para el año 2020 se incrementan las emisiones siendo que para este año se deberían llevar al menos el 70% de los recambios planificados.

³ Tomando en cuenta una población de 780.627 para el año 2022 (SUBDERE, 2023)

A pesar de que el proyecto de recambio de calefactores llegó a su fin, en marzo del año 2023 se publicó un decreto que establece un Plan de Descontaminación Atmosférica Para El Valle Central De La Región Del Libertador Bernardo O'Higgins, el cual se espera realizar más de 8.000 recambios de calefacción domiciliaria (*Decreto 1*, 2023).

Tras analizar los datos disponibles y examinar la situación en los distintos sectores, se concluye que la hipótesis planteada no se sostiene por las siguientes razones:

En primer lugar, se observa que el sector Transporte ha experimentado un aumento en las emisiones a pesar de tener una proyección poblacional baja y una variación negativa en el Producto Interno Bruto (PIB). Por otro lado, el sector energía ha logrado disminuir sus emisiones gracias a la implementación de generadoras de electricidad basadas en energías renovables, como biomasa, eólica y solar, lo que ha llevado a una menor emisión de CO_2 .

En cuanto al sector Industria, se ha registrado un aumento en las emisiones a pesar de que el crecimiento del PIB para el año 2017 fue de -1,1% en la región, lo cual es 2,8 puntos porcentuales inferior al crecimiento a nivel nacional (*ver anexo 35*). Por último, en el sector Residencial, a pesar de la implementación de una acción específica, no se aprecia una disminución significativa en las emisiones. Por estas razones la hipótesis es rechazada.

Conclusiones

Los resultados de esta investigación demuestran que las emisiones regionales no siguen la tendencia nacional como es el caso del sector residencial, ya que a escala regional es la principal fuente de emisiones de dióxido de carbono, sin embargo, a nivel regional es la que menos presenta.

Por otra parte, se puede concluir que la versión nueva del inventario de emisiones que contiene el año 2020 no es comparable con la versión 1, que contiene los años 2016 y 2017 por el hecho que se utilizan metodologías diferentes para su elaboración, lo que implica grandes diferencias entre el año 2016–2017 y 2020.

En la discusión se describe los resultados obtenidos al realizar la validación de INEMA, en la cual se identificaron algunos outliers que son significativas para el estudio como el de sector industrial o residencial, sin embargo, en el sector de transporte la inconsistencia que se presentó es de gran significancia para el estudio porque no se logra diferenciar la distribución espacial de las emisiones, ya que en todas los puntos de grilla se presenta la misma concentración. Esto demuestra la importancia de validar

Al analizar las emisiones de contaminantes en la Región de O'Higgins junto al Plan de Acción y el resto de los antecedentes se puede concluir que la región ha mostrado una preocupación destacable por el sector Energía. Esto se refleja en una disminución notable en las emisiones, la cual se atribuye principalmente a la reducción en el uso de combustibles fósiles. Sin embargo, el sector Industrial es el segundo sector con mayores emisiones de material particulado fino y grueso, principalmente debido a actividades como la agricultura, la industria de alimentos y actividades relacionadas minería, lo cual es preocupante por el efecto que tienen estos contaminantes en la salud humana, por lo que se deberían realizar políticas públicas para la mitigación de emisiones en este sector. En cuanto al sector de Transporte, es el sector con mayor emisión de dióxido de carbono, principalmente debido a la combustión de combustibles fósiles y por el hecho de que región no cuenta restricciones para el parque automotriz antiguo, lo que provoca un mayor índice de material particulado fino.

Por último, la validación del inventario tiene una importancia fundamental para investigaciones posteriores, puesto que posibilita la identificación de posibles inconsistencias presentes en esta versión. Además, esta validación proporciona un modelo que puede ser replicado en versiones futuras del inventario, contribuyendo así a un proceso de mejora continua. Asimismo, posibilita la verificación de si las inconsistencias identificadas en esta versión han sido abordadas de manera efectiva.

Recomendaciones

Una vez analizadas las emisiones de los distintos sectores y tomando en cuenta los antecedentes presentados en esta investigación tanto para la Región de O'Higgins, como a nivel nacional es posible identificar un conjunto de recomendaciones que apuntan a reducir el impacto de los contaminantes.

En cuanto al sector Transporte, el Instituto Nacional de estadísticas realiza un Resumen de transporte para algunas de las regiones del país, el cual contiene información sobre el transporte de pasajeros, transporte de carga, permisos de circulación, entre otra información relevante y oportuna. Sin embargo, para la Región de O'Higgins no se encuentra disponible este informe, por lo que se propone llevar a cabo la realización de este informe que abarque todas las regiones del país, incluyendo la Región de O'Higgins, con el fin de recopilar y proporcionar datos actualizados y pertinentes sobre el transporte en cada una de ellas. Este informe resultaría de gran importancia para entender y analizar la situación del sector transporte a nivel regional como nacional, permitiendo identificar posibles áreas de mejora, tomar decisiones informadas y promover un desarrollo equitativo y sostenible en todas las regiones del país.

También se recomienda implementar políticas y medidas para reducir las emisiones de dióxido de carbono CO_2 en el sector transporte. Esto puede incluir incentivos para la adopción de vehículos cero emisiones o nuevos, dado que estos emiten menos contaminantes tanto para vehículos particulares como de transporte público. Asimismo, es fundamental establecer restricciones de circulación para los vehículos más antiguos y promover el uso de transporte público y modos de transporte más sostenibles, como la bicicleta.

Por último, se recomienda continuar y aumentar la cobertura de los Programa de Descontaminación Atmosférica. Con el proyecto recambio de calefactores y el proyecto de acondicionamiento térmico de los hogares para reducir las emisiones derivadas de la combustión de leña y mejorar la calidad del aire en los hogares, ya que el programa de recambio de calefactores abarcaba solo 12.000 recambio para la región y este término el año 2022.

Junto con esto, también es necesario una mayor fiscalización en las localidades donde se encuentre prohibido la calefacción a leña, esto puede fomentar la adopción de alternativas de calefacción más limpias y sostenibles. Al garantizar el cumplimiento de la prohibición, se impulsa la transición hacia formas de calefacción más respetuosas con el medio ambiente

Estas recomendaciones tienen como objetivo contribuir a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, mejorar la calidad del aire y promover prácticas más sostenibles en los diferentes sectores mencionados. Es importante que se lleven a cabo en colaboración con entidades gubernamentales, la industria y la sociedad en general para lograr un impacto significativo.

Con respecto al inventario de emisiones se recomienda actualizar los datos para el año 2015, ya que al presentar error en los sectores de Energía e Industria con respecto al total de emisiones emitidas por año, también se recomienda que para el año 2020 y los futuros años que sean agregados en nuevas versiones del inventario, el sector Residencial sea separado en las categorías de urbano y rural de esta manera tomar conciencia de las emisiones emitidas por cada uno de estos subsectores.

Por último, es altamente recomendable mantener un inventario de emisiones actualizado, ya que brinda la posibilidad de verificar el cumplimiento de las regulaciones ambientales, establecer objetivos y metas con respecto a la reducción de emisiones, y evaluar la efectividad de las políticas públicas destinadas a mitigar el aumento de las emisiones.

Referencias

- Álamos, N., Huneeus, N., Opazo, M., Osses, M., Puja, S., Pantoja, N., Denier van der Gon, H., Schueftan, A., Reyes, R., & Calvo, R. (2022). High-resolution inventory of atmospheric emissions from transport, industrial, energy, mining, and residential activities in Chile. *Earth System Science Data*, 14(1), 361–379. <https://doi.org/10.5194/essd-14-361-2022>
- Alamos, N., Hunneus, N., Osses, M., Opazo, M., Puja, S., & Pantoja, N. (2021). *INEMA: High resolution inventory of atmospheric emissions from transport, industrial, energy, mining, and residential sectors of Chile* (1.0) [Data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.4784286>
- Amann, M., Bertok, I., Borken-Kleefeld, J., Cofala, J., Heyes, C., Höglund-Isaksson, L., Klimont, Z., Nguyen, B., Posch, M., Rafaj, P., Sandler, R., Schöpp, W., Wagner, F., & Winiwarter, W. (2011). Cost-effective control of air quality and greenhouse gases in Europe: Modeling and policy applications. *Environmental Modelling & Software*, 26(12), 1489–1501. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.07.012>
- Asociación Nacional Automotriz de Chile, (ANAC). (2017). *Anuario Automotriz 2016/2017*. Antropogénico. (s. f.). [eltiempo.es. https://www.eltiempo.es/noticias/meteopedia/antropogenico](https://www.eltiempo.es/noticias/meteopedia/antropogenico)
- Arellano, B. S. (2021). *Aire continúa siendo una prioridad de la gestión ambiental*.
- Corporación De Fomento de la Producción (CORFO). (2022). *Informe Económico Región de O'Higgins*.
- Conceptos de calidad del aire*. (s/f). Gob.cl. Recuperado el 8 de agosto de 2023, de <https://ppda.mma.gob.cl/conceptos-de-calidad-del-aire/>
- Center for Climate and Resilience Research (CR2). (2020). *El aire que respiramos: Pasado, presente y futuro*.

- Crippa, M., Guizzardi, D., Muntean, M., Schaaf, E., Monforti-Ferrario, F., Banja, M., Olivier, J. G. J., Vignati, E., Solazzo, E., & Grassi, G. (2021). *GHG emissions of all world: 2021 report*. Publications Office of the European Union. <http://dx.doi.org/10.2760/173513>
- Diario y Radio Universidad Chile. (2011, diciembre 28). *Expertos aseguran que leña certificada terminaría con problema de contaminación atmosférica en el sur*. <https://radio.uchile.cl/2011/12/28/expertos-aseguran-que-lena-certificada-terminaria-con-problema-de-contaminacion-atmosferica-en-el-sur/>
- E2BIZ. (2020). *Plan de Acción Regional de Cambio Climático—Región de O'Higgins*. <https://consultaciudadanas.mma.gob.cl/storage/records/4pbdatMslzvt40vOI5ZHT4KS GZNzMsi9igwbrsTI.pdf>
- Environmental Protection Agency, (EPA). (s. f.). *Emisiones de dióxido de carbono*. [https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/emisiones-de-dioxido-de-carbono#:~:text=El%20di%C3%B3xido%20de%20carbono%20\(CO,UU](https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/emisiones-de-dioxido-de-carbono#:~:text=El%20di%C3%B3xido%20de%20carbono%20(CO,UU)
- Environmental Protection Agency, (EPA). (2018). *Efectos del material particulado (PM) sobre la salud y el medioambiente*. <https://espanol.epa.gov/espanol/efectos-del-material-particulado-pm-sobre-la-salud-y-el-medioambiente>
- European Environment Agency. (2019). *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019: Technical guidance to prepare national emission inventories*. Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2800/293657>
- Instituto Nacional de Estadísticas, (INE). (2019). *Informe anual de medio ambiente 2019*. INE.
- Ministerio de Energía. (2022, septiembre). *Transporte Menor Público de O´Higgins se suma a los desafíos de la electromovilidad accediendo a financiamiento a través del Programa Mi Colectivo Eléctrico*. <https://energia.gob.cl/noticias/libertador-general-bernardo-ohiggins/transporte-menor-publico-de-ohiggins-se-suma-los-desafios-de-la-electromovilidad-accediendo-financiamiento-traves-del-programa-mi-colectivo-electrico>
- Decreto 12*, (2022) (testimony of MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE). <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?i=1176988&f=2022-06-04>

Decreto 1, (2023) (testimony of MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE).
<https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1190758&idParte=&idVersion=2023-03-29>

Encuesta de Caracterización Socioeconómica Nacional (CASEN). (2017). Encuesta CASEN 2017.

Escudero, E. (2022, agosto 5). Las emisiones de la industria alimentaria: su efecto en la producción y el medio ambiente. The Food Tech. <https://thefoodtech.com/seguridad-alimentaria/las-emisiones-de-la-industria-alimentaria-su-efecto-en-la-produccion-y-el-medio-ambiente/>

Ministerio de Vivienda y Urbanismo, (MINVU). (2018). *SUBSIDIOS PARA ACONDICIONAMIENTO TÉRMICO DE VIVIENDAS*. https://csustentable.minvu.gob.cl/wp-content/uploads/2018/10/Folleto_ATV_web-agosto.pdf

Ministerio del Medio Ambiente, (MMA). (s. f.). *Recambio de calefactores*. <https://calefactores.mma.gob.cl/>

Ministerio del Medio Ambiente, (MMA). (2015, julio 1). *Autos con 10 años de uso contaminan 20 veces más que uno nuevo*. [mma.gob.cl. https://mma.gob.cl/autos-con-10-anos-de-uso-contaminan-20-veces-mas-que-uno-nuevo/](https://mma.gob.cl/autos-con-10-anos-de-uso-contaminan-20-veces-mas-que-uno-nuevo/)

Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes, (RETC). (s. f.). *Emisiones al aire de fuentes puntuales*. <http://datosretc.mma.gob.cl/group/emisiones-al-aire>

Rojas, O. E. (2022, diciembre 4). AWS re:Invent 2022: ¿Cuáles son los principales desafíos de la nube? Canal TI. <https://canalti.pe/aws-reinvent-2022-cuales-son-los-principales-desafios-de-la-nube/>

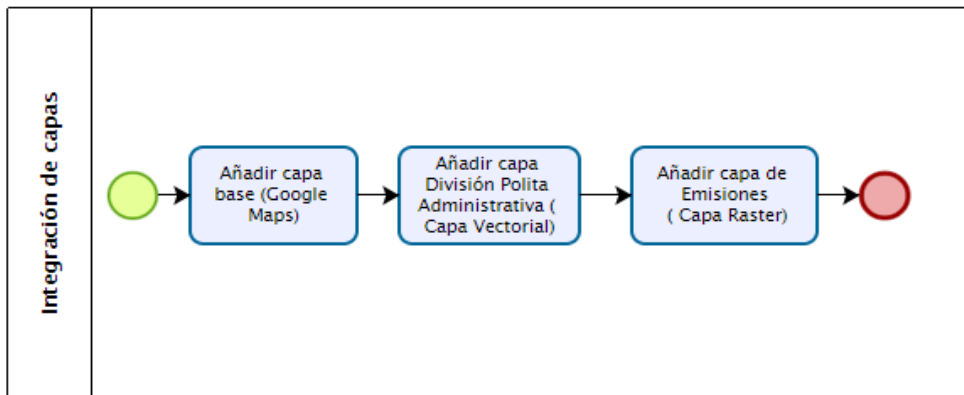
Servicio Nacional del Consumidor, (SERNAC). (2007, junio 4). *Beneficios de la leña certificada*. <https://www.sernac.cl/portal/607/w3-article-1496.html>

Sistema de información nacional de Calidad del Aire, (SINCA). (s. f.). *Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire*. <https://sinca.mma.gob.cl/>

- Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo, (SUBDERE). (2023). *Gobierno Regional de O'Higgins*. <https://www.subdere.gov.cl/divisi%C3%B3n-administrativa-de-chile/gobierno-regional-de-ohiggins#:~:text=La%20poblaci%C3%B3n%20regional%20es%20de,promedio%20anual%20es%20de%201.2%25>.
- World Health Organization, (OMS). (2021). *WHO global air quality guidelines. Particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*.
- Xu, X., Sharma, P., Shu, S., Lin, T.-S., Ciais, P., Tubiello, F. N., Smith, P., Campbell, N., & Jain, A. K. (2021). Global greenhouse gas emissions from animal-based foods are twice those of plant-based foods. *Nature Food*, 2(9), 724–732. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00358-x>
- Zaviezo, M. M. L., Ramón Figueroa, Felipe Figueroa, Carmen Leyton, Rodrigo Berner. (2019). *Evaluación Programa de Recambio de Calefactores a Leña del Ministerio del Medio Ambiente* (p. 130). https://www.dipres.gob.cl/597/articles-187242_informe_final.pdf

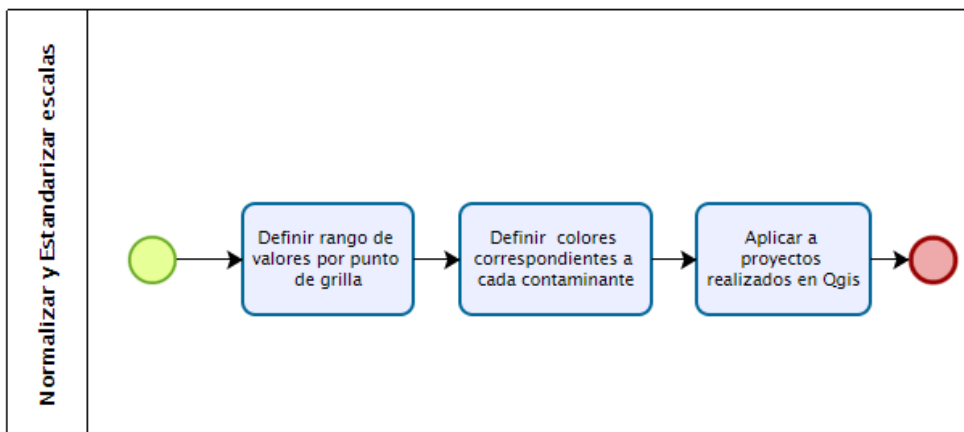
Anexos

Anexo 1: Integración de capas



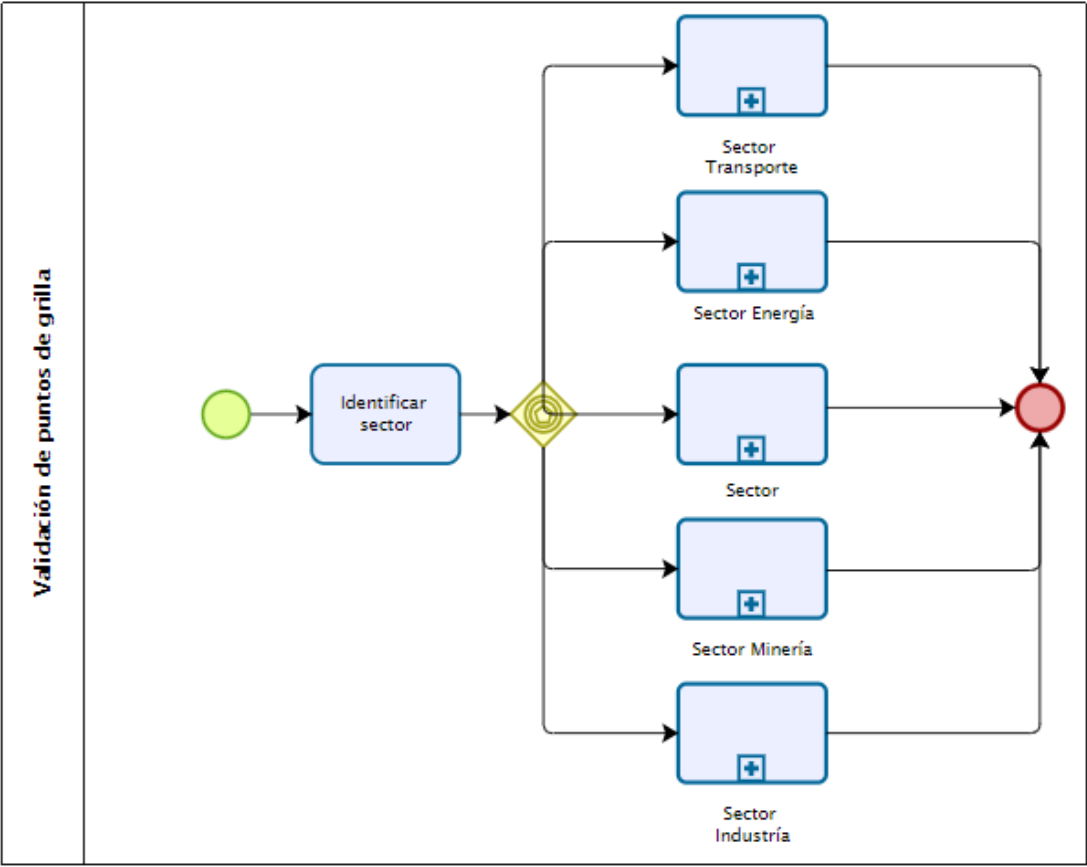
Fuente: Elaboración Propia

Anexo 2: Normalizar y Estandarizar datos



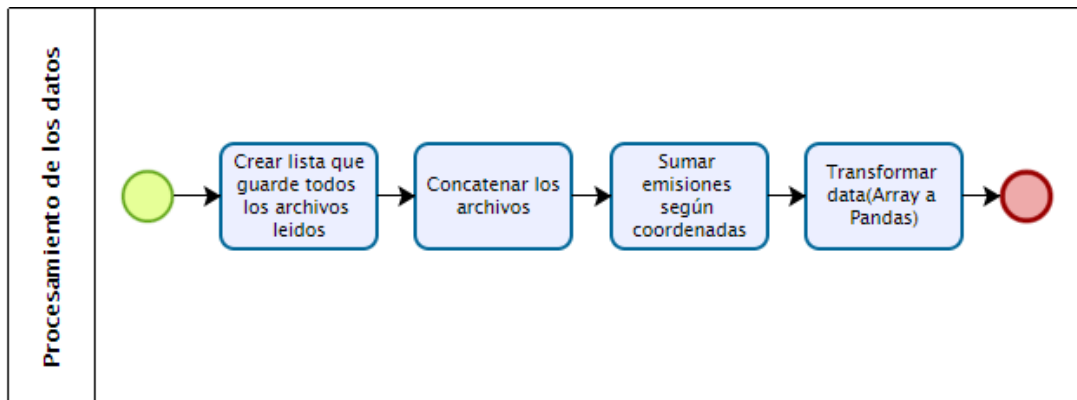
Fuente: Elaboración Propia

Anexo 3: Validación de puntos de grilla



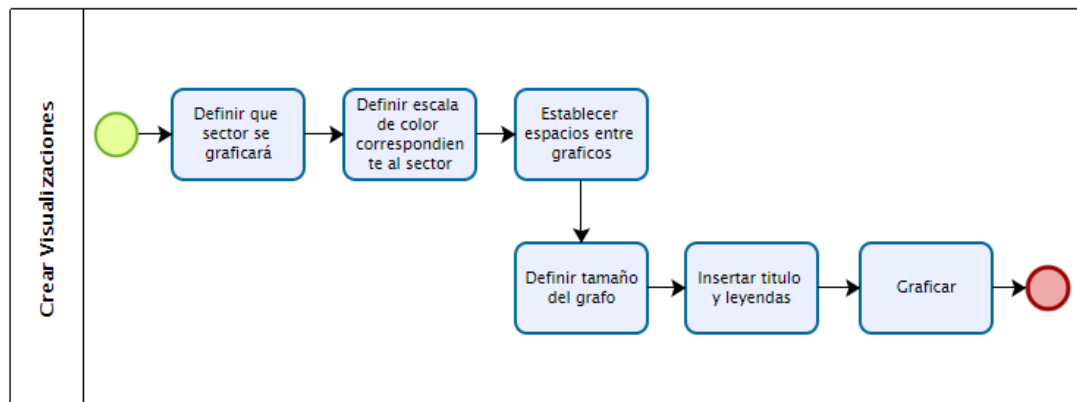
Fuente: Elaboración Propia

Anexo 4: *Procesamiento de datos*



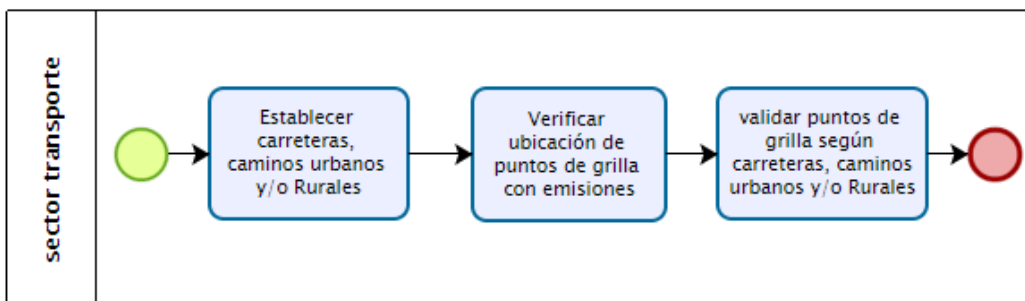
Fuente: *Elaboración Propia*

Anexo 5: *Crear Visualizaciones*



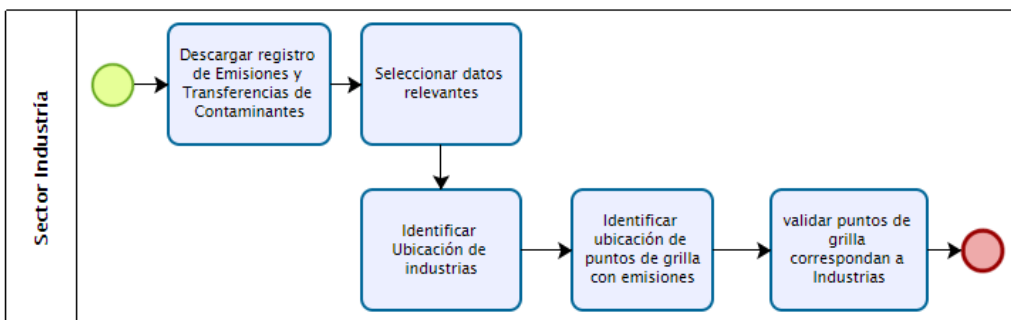
Fuente: *Elaboración Propia*

Anexo 6: *Sector Transporte (Subproceso Validación punto de Grilla)*



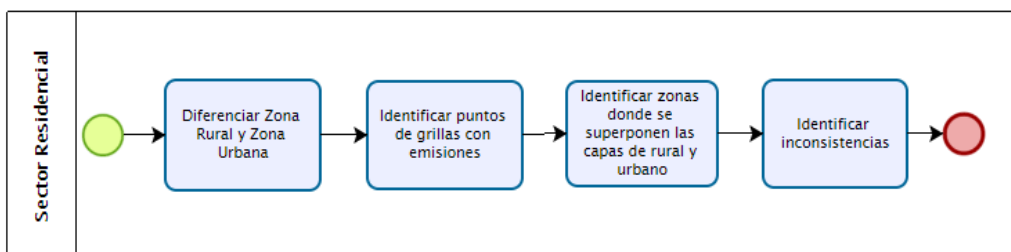
Fuente: *Elaboración Propia*

Anexo 7: Sector Energía (Subproceso Validación punto de Grilla)



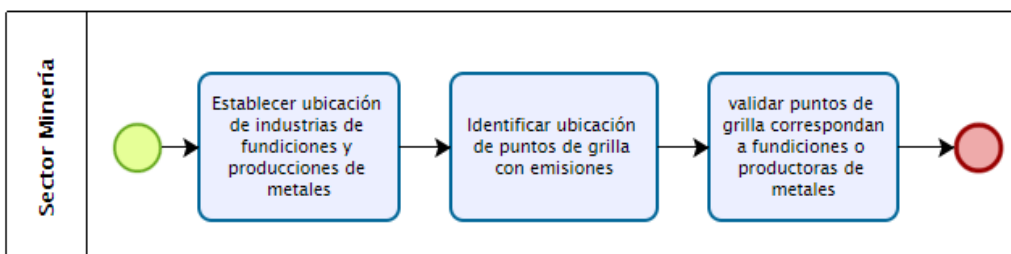
Fuente: Elaboración Propia

Anexo 8: Sector Residencial (Subproceso Validación punto de Grilla)



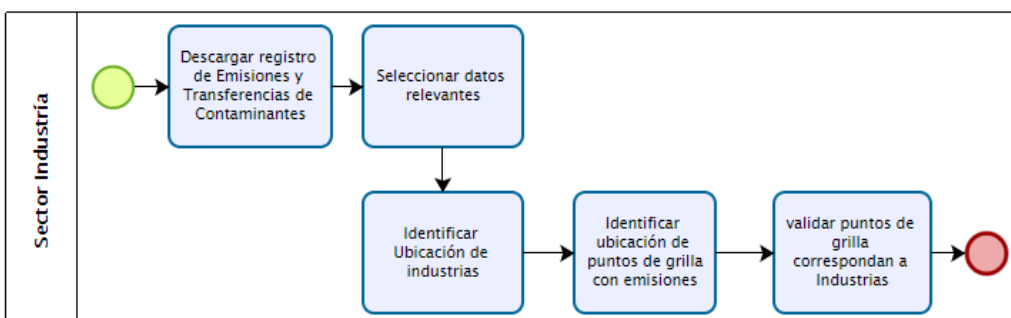
Fuente: Elaboración Propia

Anexo 9: Sector Minería (Subproceso Validación punto de Grilla)



Fuente: Elaboración Propia

Anexo 10: Sector Industria (Subproceso Validación punto de Grilla)



Fuente: Elaboración Propia

Anexo 11: Lectura de datos

```
1      p= Path("C:/Users /OneDrive/Inventario")
2      pattern= '*CO2_Transport_*.nc'
3      files= list(p.rglob(pattern))
```

Anexo 12: Procesamiento de datos

```
1      ds_list=list()
2      y=2015
3      for f in files:
4          if '2016' in str(f) or ('2017' in str(f)) or ('2020' in str(f)) :
5              print(f)
6              ds= xr.open_dataset(f)
7              ds.expand_dims(dim='year',axis=2)
8              ds.coords['year']=y
9              y +=1
10             ds_list.append(ds)
11             ds_concat= xr.concat(ds_list, dim='year')
```

Anexo 13: Creación Data Mart

```
1      Sector_contaminante=ds_contac.sum(dim=['lat','lon'])
2      Sector_contaminante=Sector_contaminante.to_dataframe()
```

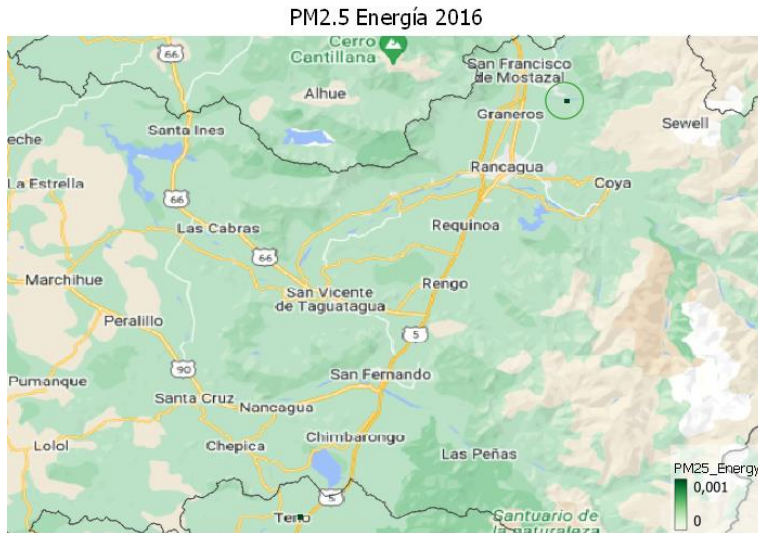
Anexo 14: Crear visualizaciones

```
1      fig, axes = plt.subplots(nrows=2, ncols=2)
2      Emisiones_chile['CO2 Residencial'].plot.bar(ax=axes[0,0],
3                                                  color='pink',
4                                                  title='CO2 Residencial',
5                                                  ylabel=('Emisión (Kton/year)'))
6      Emisiones_chile['CO2 Transporte'].plot.bar(ax=axes[0,1],
7                                                  color='royalblue',
8                                                  title='CO2 Transporte',
9                                                  ylabel=('Emisión (Kton/year)'))
10     Emisiones_chile['CO2 Energia'].plot.bar(ax=axes[1,0],
11                                             color='gold',
12                                             title='CO2 Energia',
13                                             ylabel=('Emisión (Kton/year)'))
14     Emisiones_chile['CO2 Industria'].plot.bar(ax=axes[1,1],
15                                             color='indianred',
16                                             title='CO2 Industria',
17                                             ylabel=('Emisión (Kton/year)'))
18
19     fig.subplots_adjust(wspace = 0.5) # da espacio hacia el lado
20     fig.subplots_adjust(hspace = 0.5)#da espacio hacia abajo del grafico
21     fig.set_size_inches(6, 6)
22     fig.suptitle('Emisiones CO2 Nacional',fontsize=15)
23     fig.legend( ["Residencial", "Transporte", "Energia", "Industria"],
24                bbox_to_anchor=(0.9, 0.045),ncol = 4,)
25     plt.show()
```

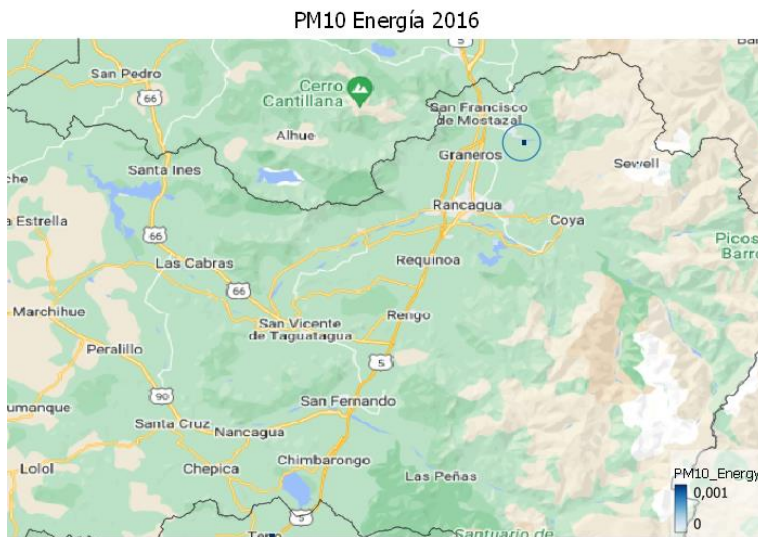
Anexo 15: Enmascarar datos para la Región de O'Higgins

```
1 ds_ohi=ds_concat.sel(lat=slice(-30,-35), lon=slice(-72,-70))
```

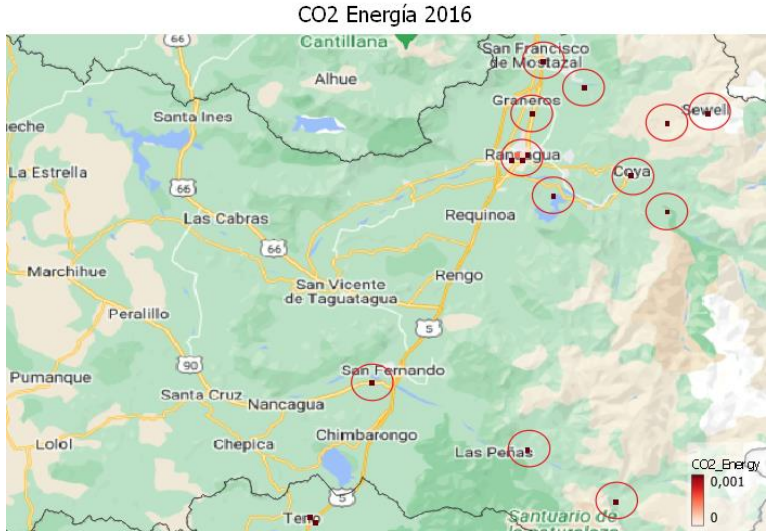
Anexo 16: Distribución espacial de emisiones de MP25 para el sector energía 2016 (kton/año)



Anexo 17: Distribución espacial de emisiones de MP10 para el sector energía 2016 (kton/año)



Anexo 18: Distribución espacial de emisiones de CO2 para el sector energía 2016 (kton/año)



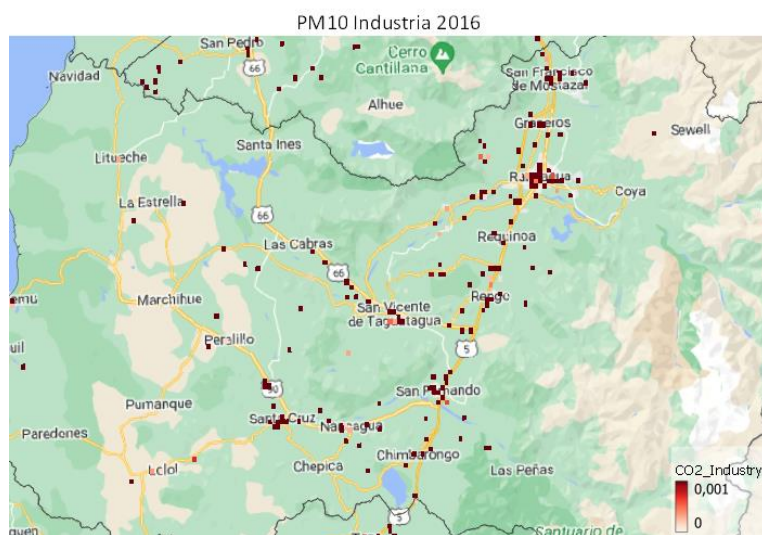
Fuente: Elaboración Propia

Anexo 19: Distribución espacial de emisiones de CO2 para el sector energía 2020 (kton/año)



Fuente: Elaboración Propia

Anexo 20: Distribución espacial de emisiones de CO2 para el sector industrial 2016 (kton/año)



Fuente: Elaboración Propia

Anexo 21: Distribución espacial de emisiones de MP25 para el sector industrial 2020 (kton/año)



Fuente: Elaboración Propia

Anexo 22: Distribución espacial de emisiones de CO2 para el sector transporte 2016 (kton/año)



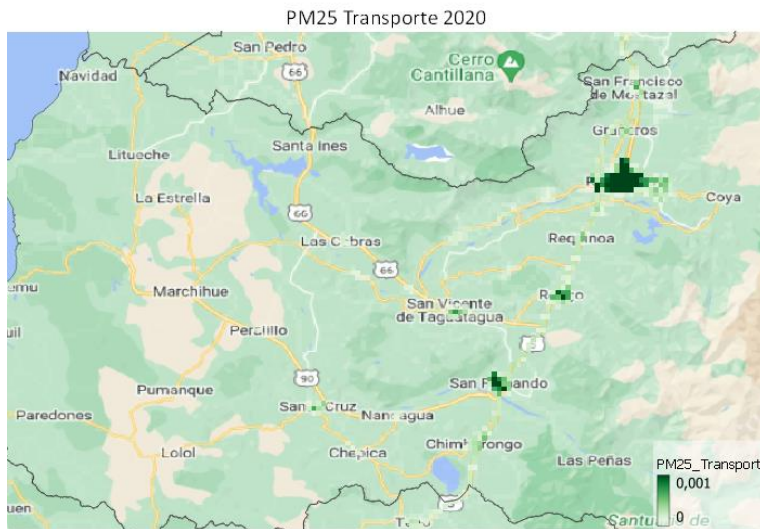
Fuente: Elaboración Propia

Anexo 23: Distribución espacial de emisiones de CO2 para el sector transporte 2017 (kton/año)



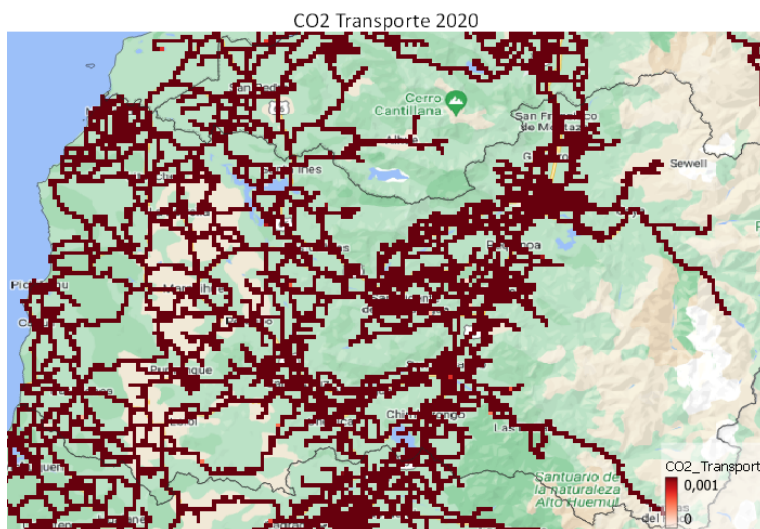
Fuente: Elaboración Propia

Anexo 24: *Distribución espacial de emisiones de MP25 para el sector transporte 2020 (kton/año)*



Fuente: Elaboración Propia

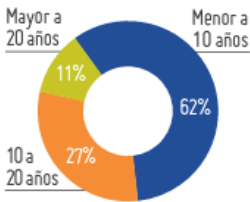
Anexo 25: *Distribución espacial de emisiones de CO2 para el sector transporte 2020 (kton/año)*



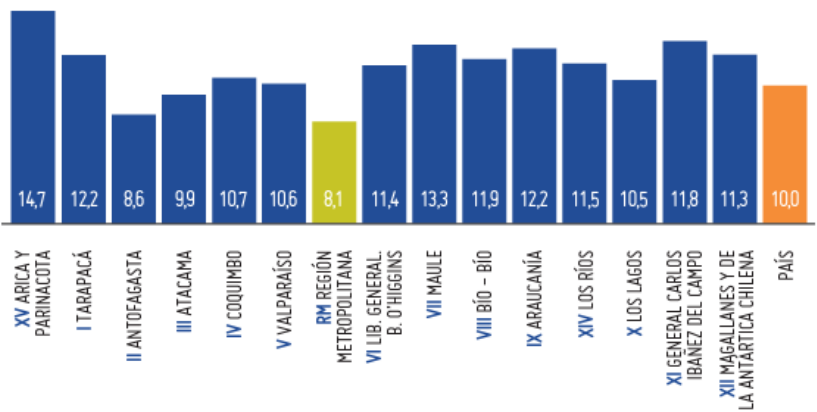
Fuente: Elaboración Propia

Anexo 26: Edad promedio parque automotriz

Antigüedad del Parque de Livianos y Medianos en Chile



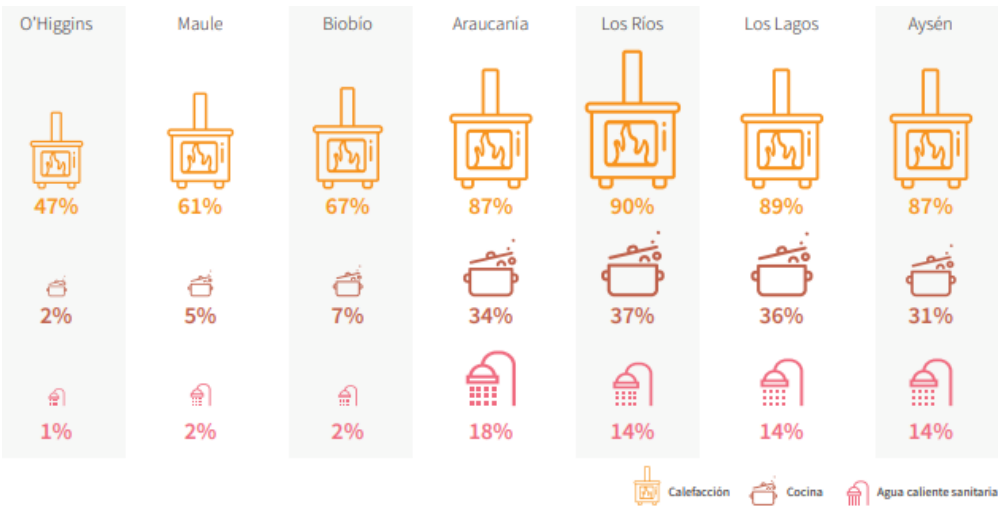
Antigüedad Promedio por Región Parque de Livianos y Medianos



Criterio Antigüedad Promedio: Para el parque 2016 se consideraron que los vehículos año de fabricación 2016 tuvieran una antigüedad de 1 año.

Fuente: ANAC, 2017

Anexo 27: Porcentaje de hogares, por región, que utiliza la leña para calefaccionar, cocinar y/o calentar agua



Fuente: CASEN 2017

Anexo 28: Tabla concentración de emisiones de MP2.5 y MP10 teórica (Kton/año)

		Energía		Industria		Residencial		Transporte	
		MP10	MP25	MP10	MP25	MP10	MP25	MP10	MP25
Chile	2016	4,6	4,1	12,5	5,7	172,0	160,1	2,4	2,2
	2017	4,6	4,1	12,5	5,7	172,5	160,6	2,4	2,2
Región de O'Higgins	2016	0,1	0,0	1,2	0,6	5,3	4,9	0,1	0,1
	2017	0,1	0,0	1,2	0,6	5,4	5,1	0,2	0,1

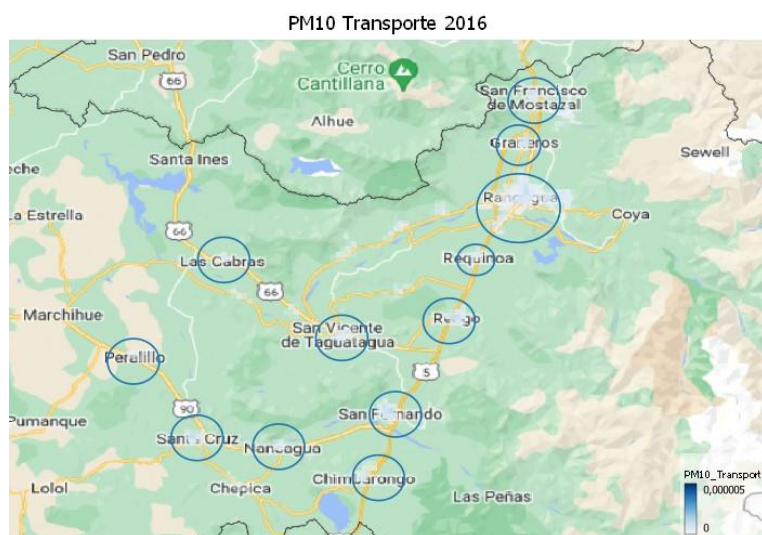
Fuente: Elaboración propia con datos proporcionados por los autores.

Anexo 29: Proyección Poblacional Región de O'Higgins

Año	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Proyección Poblacional	877.559	886.178	894.409	902.449	910.577	918.751	926.828	934.671	942.257	949.575	956.619

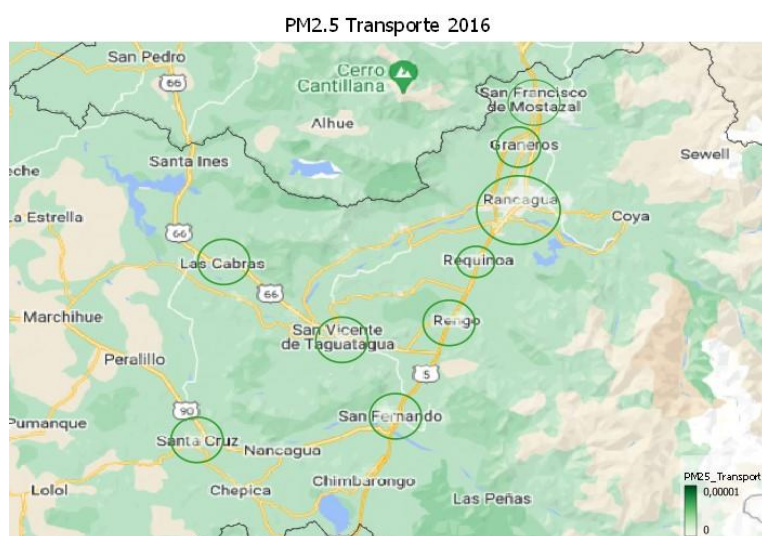
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos por el Instituto Nacional de Estadísticas (INE)

Anexo 30: Distribución espacial de emisiones de MP10 para el sector Transporte 2016 (kton/año).



Fuente: Elaboración propia

Anexo 31: *Distribución espacial de emisiones de MP2.5 para el sector Transporte 2016 (kton/año).*



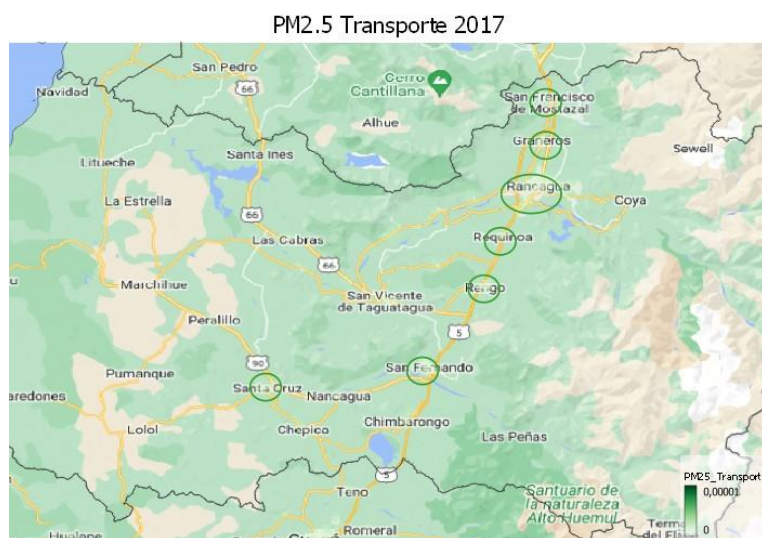
Fuente: Elaboración propia

Anexo 32: *Distribución espacial de emisiones de MP10 para el sector Transporte 2017 (kton/año).*



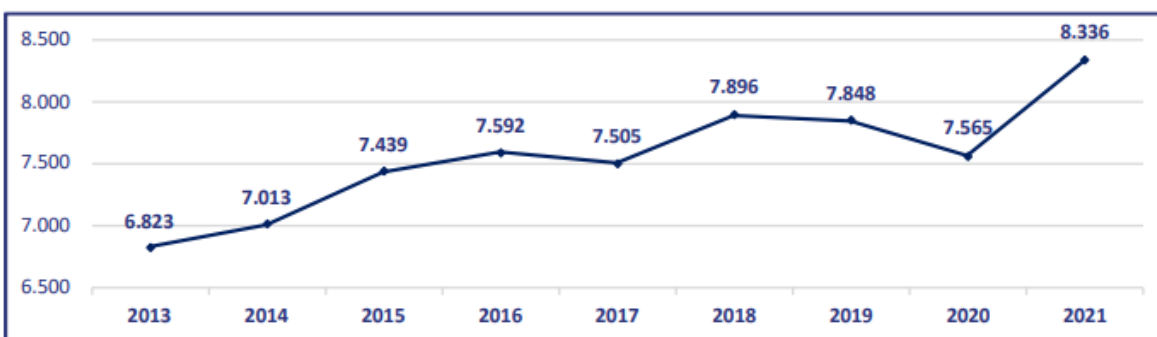
Fuente: Elaboración propia

Anexo 33: *Distribución espacial de emisiones de MP2.5 para el sector Transporte 2017 (kton/año).*



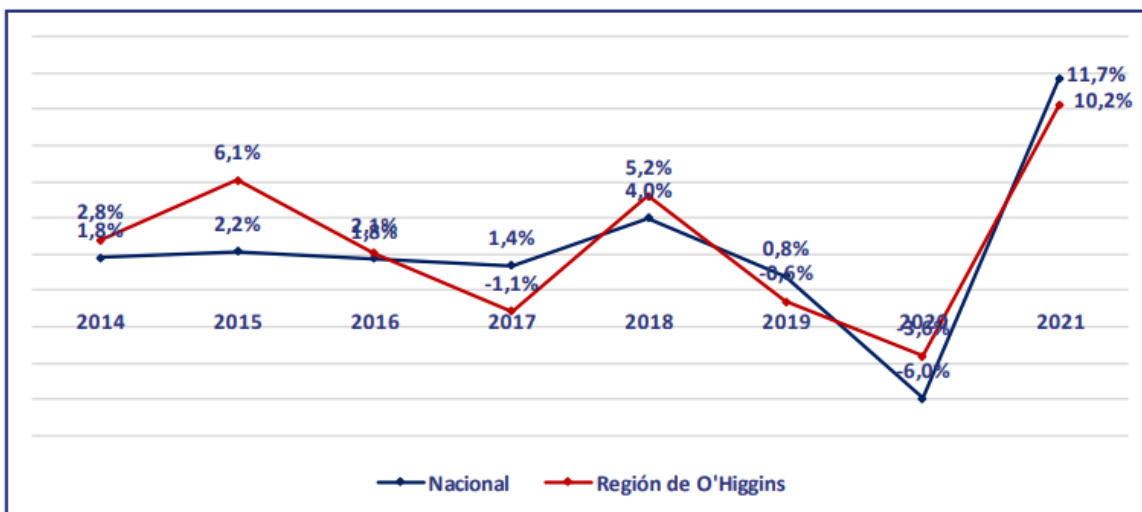
Fuente: Elaboración propia

Anexo 34: Producto Interno Bruto – PIB – región de O'Higgins 2013 – 2021 (Miles de millones de pesos)



Fuente: Informe Económico Región de O'Higgins (CORFO, 2022)

Anexo 35: Variación del Producto Interno Bruto – PIB – región de O'Higgins y Nacional 2013-2021



Fuente: Informe Económico Región de O'Higgins (CORFO, 2022)