Informe Número

1575423

Original

EVALUACIÓN SIGNIFICANCIA DEL IMPACTO DE LAS EMISIONES DE UN PROYECTO O ACTIVIDAD EN ZONAS SATURADAS EN EL MARCO DEL SEIA

ID Licitación: 1588-16-LE21

Estudio solicitado por el Servicio de Evaluación Ambiental

INFORME FINAL

Santiago, 08 de marzo de 2022

Título del Proyecto

Evaluación Significancia del Impacto de las Emisiones de un Proyecto o Actividad en Zonas Saturadas en el Marco del SEIA

Autores:

Jefe de proyecto: Luis Cifuentes

Asesores expertos: Héctor Jorquera, Gustavo Lagos Cruz-Coke

Ingeniero de proyecto: Viviana Cerda Gho, María Jesús Melej, Rocío Herrera, Daniela Madrazo, Sofía Contardo

Dictuc S.A.

Vicuña Mackenna Nº 4860, Macul – Santiago

Datos Mandante

Razón Social: Servicio de Evaluación Ambiental

RUT: 72.443.600-5

Dirección: Miraflores 222, Piso 19, Santiago.

Cuerpo del informe

172 hojas (incluye portada)

Fecha del informe

08/marzo/2022

Información Contractual

Correlativo Contrato: 3124

OC N°: 1588-354-SE21

Contraparte técnica

Nombre: Gino Olivares y Damary Fonseca

Cargo: Profesionales del Departamento de Estudios y Desarrollo, y del Departamento de Soporte a Proyectos Complejos, respectivamente.

E-mail: gino.olivares@sea.gob.cl, damary.fonseca@sea.gob.cl

Resumen

La presente consultoría tiene por objetivo proponer criterios que sean aplicables en el marco del SEIA, al momento de evaluar la significancia del impacto sobre el riesgo para la salud de la población de emisiones atmosféricas de contaminantes normados generadas por proyectos o actividades emplazados en zonas saturadas o en estado de saturación.

Sr. Luis Cifuentes

Director GreenLab

Dictuc S.A.

Sr. Felipe Bahamondes

Gerente General

Dictuc S.A.

Felipe Bahamondes Cid

Firmado digitalmente por Felipe Bahamondes Cid
Fecha: 2022.03.15 11:41:29 -03'00'

Tabla de Contenidos

Tabla de Contenidos I
Lista de Tablas V
Lista de Figuras VII
Acrónimos y Abreviaturas IX
Resumen Ejecutivo XII
1. Antecedentes 21
2. Objetivos del estudio 26
2.1 Objetivo general 26
2.2 Objetivos específicos 26
2.3 Alcance del presente informe 27
3. Estado del arte internacional 28
3.1 Revisión de criterios de normativa internacional en la evaluación ambiental de contaminantes en zonas que se encuentren sobrepasadas 28
3.1.1 EE.UU. 31
3.1.1.1 Guía sobre los niveles de impacto significativo del O_3, $MP_{2,5}$, SO_2 y NO_2 en el programa de permisos PSD 31
3.1.1.1.1 Uso de SILs o similares en algunos estados de EE.UU. 36
3.1.1.2 NSR Workshop Manual 40
3.1.2 Reino Unido 41
3.1.2.1 Guía para la Evaluación de Riesgo de Emisiones Atmosféricas para Permiso Ambiental 41
3.1.2.2 Control de planificación y desarrollo del uso del suelo: planificación para la calidad del aire 44
3.1.3 Unión Europea 47
3.1.3.1 Guía para la Elaboración de Evaluaciones de Impacto Ambiental 48
3.1.4 Países Bajos – Decreto "Not make a significant contribution" 54
3.1.5 Nueva Zelanda – Reglamento de Gestión de Recursos (Estándares Ambientales Nacionales de Calidad del Aire) 55
3.1.6 New South Wales, Australia – Procedimiento escalonado para estimar los impactos de las concentraciones de ozono a nivel del suelo de fuentes estacionarias 56

3.1.7 Resumen de los criterios identificados 57
3.2 Reunión con el equipo técnico del SEA para definir qué criterios son replicables 59
3.3 Criterios para definir significancia del impacto a partir de la revisión del estado del arte internacional 59
4. Estudios nacionales e internacionales de afectación a la salud 61
4.1 Revisión y recopilación de literatura nacional e internacional referente a los efectos de los contaminantes sobre la salud de las personas 61
4.1.1 Marco teórico 61
4.1.1.1 Efectos de exposición crónica 63
4.1.1.1.1 Linealización de la Relación Concentración-Respuesta 64
4.1.1.2 Efectos de exposición aguda 66
4.1.1.3 Riesgo relativo 67
4.1.2 Coeficiente de riesgo unitario (beta) 69
4.1.2.1 Guía metodológica para la elaboración de AGIES para instrumentos de calidad del aire 70
4.1.2.2 Estudio de metodologías para la evaluación de normas de calidad y complemento a estimación de beneficios en salud derivados de la contaminación atmosférica 72
4.1.2.3 Contaminación del aire por partículas finas y mortalidad humana: más de 25 años de estudios de cohortes 75
4.1.2.4 Referencias asociadas a los efectos del MP_{10} 80
4.1.2.5 Referencias asociadas a los efectos del CO 81
4.1.2.6 Referencias asociadas a los efectos del Pb 81
4.1.3 Riesgo aceptable 82
4.1.3.1 Francia – Evaluación del estado del medio ambiente y riesgos para la salud, Departamento de Sitio y Territorio 83
4.1.3.2 Países Bajos – Hacer frente a los riesgos, Cámara de los representantes y Decreto sobre seguridad externa de los establecimientos (2004) 85
4.1.3.3 Estados Unidos – primeros estudios: Milvy (1987) y Whipple (1988) 86
4.1.3.4 Australia – Environmental Health Risk Assessment: Guidelines for assessing human health risks from environmental hazards 88
4.1.3.5 Resumen comparativo de los riesgos aceptables identificados 88
4.2 Reunión con el equipo técnico del SEA para definir qué criterios son replicables 89

4.3 Criterios para definir significancia del impacto según estudios de afectación a la salud 90

5. Diagnóstico de evaluación en el marco del SEIA 92

5.1 Identificación de las zonas declaradas saturadas a nivel nacional 92

5.2 Sistematización de la evaluación ambiental en las zonas saturadas, en los últimos dos años 98

5.3 Análisis de la evaluación ambiental en las zonas saturadas, en los últimos dos años .. 99

5.4 Criterios para definir significancia del impacto en proyectos aprobados en el SEIA en el periodo 2019-2020 110

6. Aplicación en el marco del SEIA 113

6.1 Propuesta de listado de criterios a ser analizados y consensuados con el equipo técnico del SEA 113

6.2 Descripción de la metodología general de la USEPA para el cálculo de SILs 114

6.2.1 Base de datos de calidad del aire 114

6.2.2 Bootstrapping 114

6.2.3 Factores relevantes en la elección de un SIL 115

6.2.4 Cálculo SILs 116

6.3 Metodología del cálculo del SIL de $MP_{2,5}$ anual y diario y O_3 117

6.3.1 Validación de promedio diario de $MP_{2,5}$ 117

6.3.2 Requisito de completitud para el cálculo del VC del $MP_{2,5}$ anual 117

6.3.3 Requisito de completitud para el cálculo del VC $MP_{2,5}$ diario 118

6.3.4 Requisito de completitud para el cálculo del VC ozono 118

6.4 Aplicación al contexto nacional 119

6.4.1 Cálculo de SILs para $MP_{2,5}$, MP_{10}, O_3, NO_2, CO y SO_2 122

6.4.2 Resultados SILs estimados 123

6.4.2.1 $MP_{2,5}$ 125

6.4.2.2 MP_{10} 127

6.4.2.3 O_3 129

6.4.2.4 NO_2 130

6.4.2.5 CO 132

6.4.2.6 SO_2 134

6.4.2.7 Resumen de resultados de SIL ponderado 137

6.4.3 Caso Plomo 139

6.5 Presentación de los criterios en la forma y fondo que debiesen ser presentados en el marco del SEIA 139

6.6 Diagnóstico de las herramientas que posee el SEIA para atender a la incorporación de los criterios escogidos 141

6.7 Identificación de la información ambiental, las herramientas metodológicas y capacidades técnicas, que se requiere incorporar en el funcionamiento del SEIA 141

6.8 Recomendaciones adicionales 141

7. Conclusiones 143

8. Bibliografía 148

9. Anexos 153

9.1 Anexo 1: Descriptores de impacto sobre receptores individuales, guía de EPUK y IAQM 153

9.2 Anexo 2: Ejemplos de aplicación de la doble definición de fuente en el Clean Air Act154

9.3 Anexo 3: Diagrama de procedimiento propuesto para la evaluación del impacto del ozono de fuentes nuevas o modificadas 156

9.4 Anexo 4: Umbrales de emisión para NO_X y COV (NSW, Australia). 157

9.5 Anexo 5: Cálculo de coeficientes de riesgo unitario de Pope et al. 2020 159

9.6 Anexo 6: Análisis de la evaluación ambiental en la región Metropolitana, en los últimos dos años 160

9.7 Anexo 7: Detalle de los modelos atmosféricos utilizados por los proyectos para la modelación de la calidad del aire 162

9.8 Anexo 8: Reunión de presentación de propuestas preliminares de criterios 163

9.9 Anexo 9: Implementación de metodología del cálculo de los SILs en R 164

9.9.1 Manuales para utilizar los archivos enviados 169

9.9.2 Manual para la reproducción de resultados de los SILs presentados en la consultoría 169

9.9.3 Manual para homologar el cálculo de los SILs con otros registros de datos del SINCA 170

Lista de Tablas

Tabla 0-1 Principales características de los criterios de significancia identificados en la documentación internacional revisada XIII
Tabla 0-2 Resumen de los tipos de efectos, efectos y contaminantes para los cuales se tiene algún registro de coeficiente de riesgo unitario (β) XIV
Tabla 0-3 Resumen de recopilación de riesgos aceptables XV
Tabla 0-4 Proyectos aprobados en 2019-2020 en el SEIA que se emplazan en comunas con alguna zona saturada, según región XVI
Tabla 0-5 Proyectos revisados que modelaron su impacto en la calidad del aire, para algún contaminante XVII
Tabla 0-6 Criterio para evaluar significancia del impacto del proyecto XVIII
Tabla 0-7 Resumen SILs ponderados [%] XIX
Tabla 0-8 Criterios recomendados de incremento significativo en la concentración de contaminantes atmosféricos en zonas saturadas XX
Tabla 3-1 Antecedentes de los Estados en los cuales no fue posible encontrar criterios replicables de evaluación de la significancia del efecto de contaminantes atmosféricos en zonas saturadas para la evaluación ambiental de proyectos 29
Tabla 3-2 Valores de SIL recomendados para Ozono y $MP_{2,5}$ NAAQS 35
Tabla 3-3 Valores SIL recomendados para $MP_{2,5}$ incrementos PSD 35
Tabla 3-4 SILs [µg/m^3] por estado y su comparación con el valor definido para EE.UU. a nivel nacional 39
Tabla 3-5 Contexto de la planificación y la calidad del aire en Inglaterra 45
Tabla 3-6 Descriptores de impacto para receptores individuales 46
Tabla 3-7 Clasificación de la sensibilidad del receptor según alguna regulación o ley 49
Tabla 3-8 Clasificación de la sensibilidad del receptor según el valor social 49
Tabla 3-9 Clasificación de la sensibilidad del receptor según la vulnerabilidad de los cambios 50
Tabla 3-10 Clasificación final de la sensibilidad del receptor 50
Tabla 3-11 Clasificación de la magnitud del impacto según la intensidad y la dirección del efecto 51
Tabla 3-12 Clasificación de la magnitud del impacto según la extensión espacial del efecto 52
Tabla 3-13 Clasificación de la magnitud del impacto según la duración del efecto 52
Tabla 3-14 Clasificación final de la magnitud total del cambio 53
Tabla 3-15 Clasificación final de la significancia del impacto 53
Tabla 3-16 Comparación entre porcentaje significativo establecido y normas de calidad del aire para MP_{10} y NO_2 en los Países Bajos 54
Tabla 3-17 Comparación entre descarga significativa y norma de Nueva Zelanda para MP_{10} 55
Tabla 3-18 Principales características de los criterios de significancia identificados en la documentación internacional revisada 58
Tabla 3-19 Asistentes reunión de definición de criterios recomendados a partir de normativa internacional 59

Tabla 4-1 Resumen cambio de incidencia en efectos en salud a causa de la contaminación atmosférica 67
Tabla 4-2 Funciones concentración respuesta recomendadas para la exposición a $MP_{2,5}$..... 71
Tabla 4-3 Funciones concentración respuesta recomendadas para la exposición a O_3 72
Tabla 4-4 Funciones concentración respuesta recomendadas para la exposición a SO_2 y NO_2 .. 72
Tabla 4-5 Funciones concentración respuesta recomendadas para la exposición a $MP_{2,5}$, según la consultoría desarrollada por GreenLab (2018) para el MMA..... 73
Tabla 4-6 Funciones concentración respuesta recomendadas para la exposición O_3, según la consultoría desarrollada por GreenLab (2018) para el MMA..... 74
Tabla 4-7 Meta-estimaciones de efectos aleatorios (cocientes de riesgo ajustados e IC del 95%) para la mortalidad por todas las causas (por elevación de 10 µg/m^3 en $MP_{2,5}$) utilizando todos los estudios y estudios seleccionados para diferentes regiones del mundo y para estudios que controlaron por distintas variables..... 79
Tabla 4-8 Riesgo relativo asociado a un incremento de 10 µg/m^3 de MP_{10} desde 1 hora hasta 7 días, según su efecto en la salud 80
Tabla 4-9 Riesgo relativo asociado a un incremento de 10 µg/m^3 de MP_{10} en plazos de meses y años, según su efecto en la salud 81
Tabla 4-10 Resumen de la relación cuantitativa entre el IQ y el Pb en la sangre de análisis que presentan niveles de Pb en la sangre más cercanos a los de los niños estadounidenses en esa época..... 82
Tabla 4-11 Cálculo de cociente de peligro y exceso de riesgo individual..... 83
Tabla 4-12 Interpretación de la comparación entre la calidad ambiental actual y la de referencia 84
Tabla 4-13 Criterios de aceptabilidad 85
Tabla 4-14 Resumen de recopilación de riesgos aceptables 88
Tabla 4-15 Resumen de recopilación de riesgos insignificantes 89
Tabla 4-16 Asistentes reunión de definición de criterios recomendados a partir de estudios nacionales e internacionales de afectación a la salud..... 89
Tabla 4-17 Asistentes reunión de presentación del informe de avance 2 90
Tabla 4-18 Incremento de concentración aceptable a partir de estudios de afectación a la salud 91
Tabla 5-1 Normas primarias de calidad del aire vigentes en Chile..... 93
Tabla 5-2 Declaraciones de zonas saturadas vigentes en el territorio nacional 95
Tabla 5-3 Comunas con saturación completa o en alguna zona para algún contaminante regulado por NPCA, según región, en el periodo 2019-2020 97
Tabla 5-4 Total proyectos aprobados en 2019-2020 en el SEIA, según región 98
Tabla 5-5 Proyectos aprobados en 2019-2020 en el SEIA que se emplazan en comunas con alguna zona saturada, según región..... 99
Tabla 5-6 Proyectos revisados que modelaron su impacto en la calidad del aire, para algún contaminante..... 100
Tabla 5-7 Criterio para evaluar la significancia del impacto del proyecto 112

Tabla 6-1 Comparación de criterios de completitud de base de datos de calidad del aire de EE.UU. y Chile 119
Tabla 6-2 Disponibilidad de datos de calidad del aire por estación de monitoreo seleccionada 121
Tabla 6-3 Valores de Cumplimiento asociados a los contaminantes analizados 122
Tabla 6-4 Estaciones de monitoreo seleccionadas según zona 123
Tabla 6-5 Resumen SILs porcentuales de la USEPA y estimados a partir del registro del SINCA138
Tabla 6-6 Resumen SILs USEPA y estimados para Chile 139
Tabla 6-7 Criterios recomendados de incremento significativo en la concentración de contaminantes atmosféricos en zonas saturadas [µg/m^3] 140
Tabla 7-1 Resumen de los tipos de efectos, efectos y contaminantes para los cuales se tiene algún registro de coeficiente de riesgo unitario (β) 144
Tabla 7-2 Resumen de recopilación de riesgos aceptables 145
Tabla 7-3 Incremento de concentración aceptable a partir de estudios de afectación a la salud 145
Tabla 7-4 Resumen SILs USEPA y estimados para Chile 146
Tabla 7-5 Criterios recomendados de incremento significativo en la concentración de contaminantes atmosféricos en zonas saturadas 147
Tabla 9-1 Umbrales de emisión de NOx y COV para fuentes estacionarias en zonas no saturadas [ton/año] 157
Tabla 9-2 Umbrales de emisión de NOx y COV para fuentes estacionarias en zonas saturadas [ton/año] 158
Tabla 9-3 Estimación de coeficientes de riesgo unitario (β) a partir de un incremento de 10 µg/m^3 de MP2,5 159
Tabla 9-4 Aporte a las concentraciones de los proyectos aprobados en el SEIA en la región Metropolitana, en 2019-2020 [µg/m^3] 160
Tabla 9-5 Aporte porcentual de cada proyecto a las concentraciones a las NPCA respectivas [%] 161
Tabla 9-6 Modelos de calidad del aire 162
Tabla 9-7 Asistentes reunión de presentación de propuestas preliminares de criterios 163
Tabla 9-8 Descripción de las funciones creadas para el cálculo de SILs en R 166

Lista de Figuras

Figura 1-1 Histograma evaluación del riesgo a la salud en zonas saturadas por MP10 24
Figura 4-1 Linealización de cambio de incidencia, ejemplo de riesgo unitario de mortalidad cardiovascular en adultos mayores a 30 años 65
Figura 4-2 Ejemplo de la recta resultante de la linealización de la función Concentración-Respuesta 66

Figura 4-3 Cocientes de riesgo (HR) ajustados estimados (e IC del 95%) para la mortalidad por todas las causas por elevación de 10 µg/m^3 en $MP_{2,5}$ de múltiples estudios de cohortes 76
Figura 4-4 Cocientes de riesgo (HR) ajustados estimados (e IC del 95%) para 77
Figura 4-5 Cocientes de riesgo (HR) ajustados estimados (e IC del 95%) para la mortalidad por cáncer de pulmón por elevación de 10 µg/m^3 en MP2,5 de múltiples estudios de cohortes 78
Figura 4-6 Riesgos individuales según el tamaño de la población en 90 circunstancias de exposición a 42 contaminantes 87
Figura 5-1 Aporte porcentual de cada proyecto a las concentraciones de MP_{10} diario respecto a la NPCA..... 101
Figura 5-2 Aporte porcentual de cada proyecto a las concentraciones de MP_{10} anual respecto a la NPCA 102
Figura 5-3 Aporte porcentual de cada proyecto a las concentraciones de $MP_{2,5}$ diario respecto a la NPCA..... 103
Figura 5-4 Aporte porcentual de cada proyecto a las concentraciones de $MP_{2,5}$ anual respecto a la NPCA..... 104
Figura 5-5 Duración fase construcción/operación en modelación del impacto en concentraciones diarias de MP_{10}..... 106
Figura 5-6 Duración fase construcción/operación en modelación del impacto en concentraciones anuales de MP_{10} 107
Figura 5-7 Duración fase construcción/operación en modelación del impacto en concentraciones diarias de $MP_{2,5}$ 108
Figura 5-8 Duración fase construcción/operación en modelación del impacto en concentraciones anuales de $MP_{2,5}$ 109
Figura 6-1 Resultados SILs de $MP_{2,5}$ anual 125
Figura 6-2 Resultados SILs de $MP_{2,5}$ diario..... 126
Figura 6-3 Resultados SILs de MP_{10} anual..... 127
Figura 6-4 Resultados SILs de MP_{10} diario 128
Figura 6-5 Resultados SILs de O_3 8 horas..... 129
Figura 6-6 Resultados SILs de NO_2 anual 130
Figura 6-7 Resultados SILs de NO_2 horario 131
Figura 6-8 Resultados SILs de CO horario 132
Figura 6-9 Resultados SILs de CO máximo diario de 8 horas..... 133
Figura 6-10 Resultados SILs de SO_2 anual 134
Figura 6-11 Resultados SILs de SO_2 diario 135
Figura 6-12 Resultados SILs de SO_2 horario 136
Figura 9-1 Descriptores del impacto sobre receptores individuales 153
Figura 9-2 Procedimiento de evaluación de los impactos del ozono de fuentes nuevas o modificadas en el Gran Área Metropolitana de New South Wales, Australia 156

Acrónimos y Abreviaturas

Instituciones, países y entidades geopolíticas

EA: Agencia Ambiental del Reino Unido, por su nombre en inglés "Environment Agency"
EE.UU.: Estados Unidos de América
EPUK: Protección Medioambiental Reino Unido, por sus siglas en inglés "Environmental Protection UK"
DEFRA: Departamento de Ambiente, Alimentación y Asuntos Rurales, por su nombre en inglés "Department of Environment, Food & Rural Affairs"
OCDE: Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico
UE: Unión Europea
USEPA: Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, por su nombre en inglés "United State Environmental Protection Agency"

Abreviaturas

AQAL: Nivel de evaluación de la calidad del aire, por sus siglas en inglés "Air Quality Assessment Level"
ACB: Análisis Costo Beneficio
AGIES: Análisis General del Impacto Económico y Social
C-R: Concentración-Respuesta
CAP: Concentración ambiental predicha
CP: Contribución de proceso
DIA: Declaración de Impacto Ambiental
EIA: Estudio de Impacto Ambiental
ERI: Exceso de Riesgo Individual
FE: Factores de Emisión
FEC: Factores Emisión-Concentración
GEI: Gases de Efecto Invernadero
IAQM: Instituto de Gestión de la Calidad del Aire, por sus siglas en inglés "Institute of Air Quality Management"
IC: Intervalo de confianza
LAER: Tasa de emisión más baja alcanzable, por su nombre en inglés "lowest achievable emission rate".
NAAQS: Estándar Nacional de Calidad del Aire Ambiental, por sus siglas en inglés "National Ambient Air Quality Standard"
NPCA: Norma Primaria de Calidad
PDA: Plan de Descontaminación Ambiental
PPG: Guía de Prácticas de Planificación, por sus siglas en inglés "Planning Practice Guidance"

PSD: Prevención de Deterioro Significativo, por sus siglas en inglés "Prevention of Significant Deterioration"
QD: Cociente de peligro, por sus siglas en francés "*Quotient de Danger*"
RR: Riesgo relativo
SIL: Nivel de Impacto Significativo, por sus siglas en inglés "Significant Impact Level"
SEIA: Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental
SPD: Documentos de Planificación Complementarios, por sus siglas en inglés "Supplementary Planning Document"
TAN: Notas de Asesoramiento Técnico, por sus siglas en inglés "Technical Advice Note"

Efectos a la salud

EA: Exacerbación del Asma
MRAD: Días con Actividad Restringida Leve, por sus siglas en inglés *Minor Restricted Activity Days*
RAD: Días con Actividad Restringida, por sus siglas en inglés *Restricted Activity Days*
SLD: Días Escolares Perdidos, por sus siglas en inglés *School Lost Days*
WLD: Días Laborales Perdidos, por sus siglas en inglés *Work Lost Days*

Causas

ASTH: Asma, por sus siglas en inglés *Asthma*
BRO: Bronquitis Aguda
CHF: Falla Cardioisquémica, por sus siglas en inglés *Congestive Heart Failure*
CLD: Enfermedad Respiratoria Crónica, por sus siglas en inglés *Congestive Lung Disease*
CVD: Enfermedades Cardiovascular, por sus siglas en inglés *Cardiovascular Disease*
DYS: Disrritmia, por sus siglas en inglés *Dysrhythmia*
IHD: Enfermedad Cardioisquemica, por sus siglas en inglés *Isquemic Heart Disease*
PNEU: Pneumonía
RSP: Enfermedades Respiratorias

Contaminantes

CO: Monóxido de carbono
MP10: Material particulado de tamaño menor o igual a 10 micrones
MP2,5: Material particulado de tamaño menor o igual a 2,5 micrones
NO_2: Dióxido de nitrógeno
O_3: Ozono troposférico
Pb: Plomo
PST: Partículas Suspendidas Totales
SO_2: Dióxido de azufre

Prefijos

k: kilo (10^3)
m: Mili (10^{-3})
µ: Micro (10^{-6})

Formato
"," separador decimal
"." separador de miles

Resumen Ejecutivo

El presente documento entrega el resultado del desarrollo de una propuesta de criterios que sean aplicables en el marco del SEIA, al momento de evaluar la significancia del impacto de emisiones atmosféricas (magnitud, duración y extensión) de contaminantes normados generados por proyectos o actividades emplazados en zonas saturadas o en estado de saturación, sobre el riesgo para la salud de la población, así como el desarrollo de todos los objetivos y actividades necesarios para esto.

En la revisión internacional de los sistemas o agencias de evaluación de impacto ambiental de proyectos en búsqueda de criterios de evaluación de la significancia del efecto de contaminantes atmosféricos en zonas saturadas o en estado de saturación en el marco de la evaluación ambiental o tramitación de permisos ambientales de proyectos o actividades realizada, se buscó identificar este tipo de criterios en la documentación de al menos los Estados referenciados en el artículo 11° del RSEIA. Lo anterior corresponde al desarrollo de las actividades asociadas al cumplimiento del objetivo específico 1 de la presente consultoría.

En esta revisión fue posible identificar criterios para EE.UU., el Reino Unido, la Unión Europea, Países Bajos, Nueva Zelanda y Australia. Las principales características de estos criterios se presentan en la Tabla 0-1.

Tabla 0-1 Principales características de los criterios de significancia identificados en la documentación internacional revisada

País/ Organización	Documento	Recomendación / Normativa	Tipo de criterio	Específico para aprobación de proyectos	Específico para zonas saturadas
EE.UU.	Guía sobre los niveles de impacto significativo del O_3, $MP_{2,5}$, NO_2 y SO_2 en el programa de permisos PSD	Recomendación	Valor de cambio de concentración definido por contaminante	Sí	No especifica
	NSR Workshop Manual	Recomendación	Cuantitativo (según magnitud de la emisión de la fuente)	Sí	No, pero contiene una sección específica (Sección 3.1.1.2).
Reino Unido	Control de planificación y desarrollo del uso del suelo: planificación para la calidad del aire	Recomendación	Porcentaje de la norma de calidad del aire	Sí	Tanto para zona sobre como bajo la norma
	Guía para la Evaluación de Riesgo de Emisiones Atmosféricas para Permiso Ambiental	Recomendación	Cuantitativo (Análisis Costo Beneficio)	Sí	No especifica
UE	Guía para la Elaboración de Evaluaciones de Impacto Ambiental	Recomendación	Cualitativo	Sí	No especifica
Países Bajos	Decreto “Not make a significant contribution”	Normativa	Porcentaje de la norma de calidad del aire	Sí	Tanto para zona sobre como bajo la norma. Sin embargo, se pueden establecer zonas de excepción si la situación de contaminación es crítica.
Nueva Zelanda	Reglamento de Gestión de Recursos (Estándares Ambientales Nacionales de Calidad del Aire)	Normativa	Valor de cambio de concentración definido por contaminante	Sí	Solo para MP10, en que considera escenario de zona saturada.
Australia	Procedimiento escalonado para estimar los impactos de las concentraciones de O_3 a nivel del suelo de fuentes estacionarias	Recomendación	Cuantitativo (umbral de emisiones y valor de cambio de concentraciones)	Sí	Sí, propone un procedimiento para zonas saturadas y no saturadas.

Fuente: Elaboración propia

Se realizó una recopilación y revisión de literatura referente a estudios nacionales e internacionales en el ámbito de la toxicología, epidemiologia y ensayos clínicos respecto a los efectos sobre la salud de las personas de los contaminantes indicados en las normas primarias de calidad del aire vigentes a nivel nacional. Lo anterior, corresponde al desarrollo de las actividades asociadas al cumplimiento del objetivo específico 2 de la presente consultoría.

En particular, el levantamiento se enfocó en dos antecedentes principales, correspondientes a factores de la ecuación de riesgo relativo:

- El coeficiente de riesgo unitario (beta) (ver Sección 4.1.2), obtenido a partir de estudios epidemiológicos, y
- El riesgo aceptable (ver Sección 4.1.3).

Mientras que, a modo de contextualización, se presenta el marco teórico del trasfondo de la selección de estos dos parámetros en la Sección 4.1.1.

En la Tabla 0-2 se detallan los efectos para los cuales se identificaron betas (β) para diferentes contaminantes. Los betas recolectados provienen de un estudio nacional, desarrollado por Cifuentes (2000), y de diferentes estudios internacionales, los cuales son principalmente de EE.UU. y Canadá.

Tabla 0-2 Resumen de los tipos de efectos, efectos y contaminantes para los cuales se tiene algún registro de coeficiente de riesgo unitario (β)

Tipo Efecto	Efecto	Contaminantes
Mortalidad Prematura Largo Plazo	Mortalidad Prematura	MP_{10}, $MP2_{,5}$
Mortalidad Prematura Corto Plazo	Mortalidad Prematura	MP_{10}, $MP_{2,5}$, CO, O_3
Acciones Médicas	Admisiones Hospitalarias	$MP_{2,5}$, NO_2, SO_2, CO, O_3
	Visitas Salas Emergencia	$MP_{2,5}$, O_3
Restricción actividad	WLD[1]	$MP_{2,5}$
	RAD[2]	$MP_{2,5}$
	MRAD[3]	$MP_{2,5}$, NO_2, O_3
	SLD[4]	O_3
	EA[5]	NO_2

Fuente: Elaboración propia

Mientras que, en la Tabla 0-3 se resumen los riesgos aceptables identificados, reportados en Francia, Países Bajos, EE.UU. y Australia.

[1] Días Laborales Perdidos, por sus siglas en inglés *Work Lost Days.*
[2] Días con Actividad Restringida, por sus siglas en inglés *Restricted Activity Days.*
[3] Días con Actividad Restringida Leve, por sus siglas en inglés *Minor Restricted Activity Days.*
[4] Días Escolares Perdidos, por sus siglas en inglés *School Lost.*
[5] Exacerbación del Asma.

Tabla 0-3 Resumen de recopilación de riesgos aceptables

Clasificación	Nivel de riesgo	Aplicación	País	Fuente
Riesgo aceptable	QD < 1 ERI < 10^{-5}	Sustancias tóxicas y cancerígenas	Francia	(Institut national de l'environnement industriel et des risques, 2013)
Riesgo aceptable	10^{-6}	Sustancias cancerígenas	Países Bajos	(Tweede Kamer der Staten-Generaal, 1988)
Riesgo aceptable	10^{-6}	Para diferentes establecimientos		(Ministerie van Volkshuisvesting, 2004)
Riesgo aceptable*	$R_L = 0{,}015\ P^{-0,5}$	Sustancias cancerígenas	Estados Unidos	(Whipple, 1988)
Riesgo aceptable	10^{-5}	Sustancias cancerígenas	Australia	(Environmental Health Standing Committee (enHealth), 2012)

(*) No se explicita con el término "aceptable", pero se análoga de acuerdo con su descripción y uso.

Fuente: Elaboración propia

En cuanto al desarrollo de las actividades asociadas al cumplimiento del objetivo específico 3 de la presente consultoría, se realizó una revisión de los últimos dos años de evaluación ambiental en las zonas geográficas que se han declarados saturadas a lo largo de Chile. Este análisis comprende la recopilación y revisión de los proyectos aprobados entre el 2019 y 2020 en dichas zonas. Una vez identificadas las zonas declaradas saturadas por la superación de alguna NPCA, se sistematizaron los proyectos aprobados entre el 2019 y 2020 en dichas zonas. Una síntesis de los proyectos comprendidos en el alcance de esta revisión se presenta en la Tabla 0-4.

Tabla 0-4 Proyectos aprobados en 2019-2020 en el SEIA que se emplazan en comunas con alguna zona saturada, según región

Región	DIA		EIA		Total proyectos
	Completa	Alguna zona	Completa	Alguna zona(*)	
Antofagasta		31		2	33
Atacama		27		4	31
Coquimbo		2			2
Valparaíso	11		1		12
Metropolitana	207		5		212
O'Higgins	17	19		1	37
Maule	18	37			55
Ñuble	23				23
Biobío	60		2		62
La Araucanía	11				11
Los Ríos	4		2		6
Los Lagos	4				4
Aysén	2				2
Total proyectos	**357**	**116**	**10**	**7**	**490**

Nomenclatura:
Completa: Comunas que se encuentran declaradas saturadas en toda su extensión.
Alguna zona: Comunas en las que alguna zona de esta se encuentra saturada, pero no la comuna completa. Proyectos emplazados en estas comunas pueden o no encontrarse en una zona saturada.
(*) De los EIA identificados en comunas con alguna zona saturada, solamente uno se emplaza en zona saturada, en la región de Antofagasta.

Fuente: Elaboración propia

En la revisión realizada de los proyectos aprobados se priorizó revisar todos los EIA, mientras que de las DIA se revisó una parte de estas, según lo acordado con la contraparte técnica. En particular, en el caso de las DIA solo se revisaron proyectos emplazados en territorios donde la totalidad de la comuna está declarada como zona saturada, y, por lo tanto, no se revisaron DIA localizadas en territorios donde solo una parte de la comuna está declarada saturada. Mientras que en el caso de los EIA se revisó caso a caso si se encontraban en zona saturada o no, para determinar si se revisaba en profundidad el proyecto o no. **En total se revisaron 167 proyectos**, incluyendo EIA y DIA, dentro de los cuales **solo 45 modelaron el impacto en la calidad del aire de sus emisiones**. Un resumen de estos se presenta en la Tabla 0-5, donde a su vez se indican los contaminantes saturados en cada caso, así como los contaminantes modelados por cada proyecto.

Tabla 0-5 Proyectos revisados que modelaron su impacto en la calidad del aire, para algún contaminante

Región	Contaminantes saturados(*)	Contaminantes modelados	DIA	EIA	Total proyectos
Antofagasta	MP_{10}	MP_{10}, $MP_{2,5}$		1	**1**
Valparaíso	MP_{10}	MP_{10}, $MP_{2,5}$	1		**1**
		MP_{10}, $MP_{2,5}$, NO_2, SO_2, CO	2		**2**
	$MP_{2,5}$, SO_2	MP_{10}, $MP_{2,5}$, NO_2, SO_2, CO	2	1	**3**
		MP_{10}, $MP_{2,5}$, NO_2, SO_2, CO, O_3	1		**1**
Metropolitana	MP_{10}, $MP_{2,5}$, O_3, CO	MP_{10}, $MP_{2,5}$	2	1	**3**
		MP_{10}, $MP_{2,5}$, NO_2		1	**1**
		MP_{10}, $MP_{2,5}$, NO_2, SO_2, CO	1		**1**
		MP_{10}, $MP_{2,5}$, NO_2, SO_2, CO, O_3		2	**2**
O'Higgins	MP_{10}, $MP_{2,5}$	MP_{10}, $MP_{2,5}$, NO_2, SO_2, CO	1		**1**
Ñuble	MP_{10}, $MP_{2,5}$	MP_{10}	4		**4**
		MP_{10}, $MP_{2,5}$	5		**5**
		MP_{10}, $MP_{2,5}$, NO_2, SO_2, CO	1		**1**
Biobío	MP_{10}, $MP_{2,5}$	MP_{10}, $MP_{2,5}$, NO_2, SO_2, CO		1	**1**
	$MP_{2,5}$	MP_{10}	1		**1**
		MP_{10}, $MP_{2,5}$	5		**5**
		MP_{10}, $MP_{2,5}$, NO_2, CO	2		**2**
		MP_{10}, $MP_{2,5}$, NO_2, SO_2		1	**1**
		MP_{10}, $MP_{2,5}$, NO_2, SO_2, CO	3		**3**
		MP_{10}, $MP_{2,5}$, NO_2, SO_2, CO, O_3	1		**1**
La Araucanía	MP_{10}, $MP_{2,5}$	MP_{10}, $MP_{2,5}$	1		**1**
Los Ríos	MP_{10}, $MP_{2,5}$	MP_{10}, $MP_{2,5}$, NO_2		1	**1**
		MP_{10}, $MP_{2,5}$, NO_2, SO_2, CO		1	**1**
Los Lagos	MP_{10}, $MP_{2,5}$	MP_{10}, $MP_{2,5}$	1		**1**
Aysén	MP_{10}, $MP_{2,5}$	MP_{10}, $MP_{2,5}$	1		**1**
Total proyectos			**35**	**10**	**45**

Nota: Contaminantes saturados fueron analizados según las comunas o la zona geográfica específica en que se emplaza el proyecto.
Fuente: Elaboración propia

Se hizo una revisión respecto a los criterios para evaluar si el impacto es significativo. Una síntesis de los criterios identificados se presenta en la Tabla 0-6.

Tabla 0-6 Criterio para evaluar significancia del impacto del proyecto

Tipo de criterio	Criterio de significancia unificado	Total proyectos
Cuantitativo	Compensación	60
	Cumple límite PPDA	48
	Cumple límite PPDA y cambio concentraciones bajo 2,5% NPCA	1
	Cumple límite PPDA y emisiones temporales	1
	Emisiones MP/MP_{10} menores a 1 ton/año	14
	Emisiones MP/MP_{10} menores a 0,1 ton/año	1
	Emisiones MP_{10} menores a 5 ton/año y NOx < 15 ton/año	1
	Emisiones MP_{10} menores a 5 ton/año y NOx < 15 ton/año y SOx < 30 ton/año	2
	No superación NPCA ni latencia en receptores cercanos	5
	Cambio concentración bajo 0,4% NPCA	1
	Cambio concentración bajo 1% NPCA	1
	Cambio concentración bajo 4,2% NPCA y cumple límites anteproyecto PDA	1
	Cambio concentración menor a 10%, y criterio de duración no especificado	1
	Cambio concentración MP_{10} bajo 3% NPCA y MP bajo 10% NPCA	1
	Cambio concentración MP_{10} bajo 5% NPCA y MP bajo 10% NPCA	1
	Cambio concentración MP_{10} y MP bajo 10% NPCA	1
	Cambio concentración menor a 0,5 µg/m^3	1
	Distancia al receptor	1
Cualitativo	Emisiones temporales, acotadas y de impacto local limitado	9
	Emisiones temporales, acotadas y de impacto local limitado, y cambio concentración menor a 0%	1
Sin información suficiente	Criterio no es claro	12
	Sin información	3
Total proyectos		**167**

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, en cuanto al desarrollo de las actividades asociadas al cumplimiento del objetivo específico 4 de la presente consultoría, se realizó una reunión con la contraparte técnica del SEIA en la que se presentaron las posibles recomendaciones de criterios, así como una propuesta preliminar. En esta reunión se acordó profundizar la metodología del cálculo de los valores de los Niveles de Impacto Significativos (o SILs por sus siglas en inglés) de la USEPA. Se calcularon estos valores utilizando la base de datos de la red de monitoreo chilena de calidad del aire (SINCA), y los resultados obtenidos se compararon con los valores establecidos por la Agencia de Protección Ambiental de EE.UU., como insumo para la definición de la recomendación definitiva. Para aplicar la metodología, el equipo experto escogió diez estaciones de monitoreo de calidad del aire a lo largo del país. Los resultados de los SILs porcentuales obtenidos a partir de la metodología señalada y los valores establecidos para EE.UU. se muestran en la Tabla 0-7. En general, los valores porcentuales de los Niveles de Impacto Significativos de la USEPA son mayores a los valores obtenidos con los datos de la red de monitoreo de calidad del aire chilena, lo que se observa en los valores de diferencias negativas entre ambos en la mayoría de los casos.

Tabla 0-7 Resumen SILs ponderados [%]

Contaminante	Periodo	SIL porcentual USEPA	SIL porcentual estimado a partir de datos del SINCA	Diferencia entre SIL porcentual estimado y SIL porcentual USEPA
$MP_{2,5}$	**24 horas**	3,4%	2,7%	-0,8%
	anual	1,7%	1,3%	-0,4%
MP_{10}	**24 horas**	3,3%	2,7%	-0,6%
	anual	2,0%	1,2%	-0,8%
O_3	**8 horas**	1,4%	1,9%	0,5%
NO_2	**1 hora**	4,0%	2,2%	-1,8%
	anual	1,0%	0,7%	-0,3%
CO	**1 hora**	5,0%	3,4%	-1,6%
	8 horas	4,9%	3,1%	-1,8%
SO_2	**1 hora**	4,0%	6,9%	2,9%
	24 horas	1,4%	4,7%	3,4%
	anual	2,0%	1,5%	-0,5%

Fuente: Elaboración propia

A partir de los resultados presentados, se selecciona como recomendación definitiva a utilizar los valores de SIL y límites definidos por la USEPA para el incremento en la concentración de contaminantes atmosféricos, destacados en letra negrita en la Tabla 0-7. Lo anterior se debe a múltiples motivos, entre los que destacan:

- En la gran mayoría de los casos, el SIL estimado con datos de monitoreo de Chile es cercano al definido por la USEPA, con diferencias absolutas menores a 2%, a excepción del SO_2 de 1 hora y 24 horas, que tiene una diferencia de 2,9% y 3,4%, respectivamente.
- Los valores de SILs de la USEPA fueron obtenidos a partir de una muestra mayor y más variada de estaciones de monitores.
- Del mismo modo, la variabilidad de la calidad del aire podría cambiar en el futuro, de modo que se generaría la necesidad de replicar el cálculo con cierta frecuencia, con la consiguiente exigencia en tiempo y recursos de esta tarea.
- Los valores definidos por la USEPA tienen el respaldo de esta institución, de las principales y más reconocidas de las que han abordado este tipo de criterios, de acuerdo a la revisión de literatura realizada.
- Por último, según juicio experto, se recomiendan valores a nivel nacional debido a que es políticamente complejo definir diferentes niveles para diferentes zonas geográficas nacionales, porque implícitamente se estaría aceptando exponer a la población a diferentes niveles de riesgo

Para el caso del plomo, si bien es un contaminante para el cual existe una NPCA, no se determinan criterios replicables recomendables a partir de la revisión bibliográfica realizada. Por lo que no se proponen criterios de límite de incremento significativo para este contaminante.

En síntesis, en la Tabla 0-8 se presentan los criterios recomendados aplicables en el marco del SEIA, al momento de evaluar la significancia del impacto de emisiones atmosféricas (magnitud, duración y extensión) de contaminantes normados generados por proyectos o actividades

emplazados en zonas saturadas o en estado de saturación sobre el riesgo para la salud de la población.

Tabla 0-8 Criterios recomendados de incremento significativo en la concentración de contaminantes atmosféricos en zonas saturadas

Contaminante	Periodo	SIL porcentual USEPA [%]	Incremento significativo en la concentración [µg/m³]
$MP_{2,5}$	24 horas	3,4%	1,7
	Anual	1,7%	0,3
MP_{10}	24 horas	3,3%	5,0
	Anual	2,0%	1,0
O_3	8 horas	1,4%	1,7
NO_2	1 hora	4,0%	16,0
	Anual	1,0%	1,0
CO	1 hora	5,0%	1.500,0
	8 horas	4,9%	488,9
SO_2	1 hora	4,0%	14,0
	24 horas	1,4%	2,0
	Anual	2,0%	1,2
Pb	Anual	Sin recomendación	Sin recomendación

Fuente: Elaboración propia

1. Antecedentes

La Ley N°19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente preceptúa que "es función del Estado dictar normas para regular la presencia de contaminantes en el medio ambiente, de manera de prevenir que éstos puedan significar o presentar, por sus niveles, concentraciones y periodos, un riesgo para la vida o salud de las personas". Estas normas, denominadas "Normas Primarias de Calidad Ambiental"[6], aplicables de manera general en todo el territorio de la República, definen los niveles que originan situaciones de emergencia a nivel nacional respecto de contaminantes específicos. Actualmente se encuentran normados los siguientes contaminantes emitidos a la atmosfera: material particulado grueso respirable (MP_{10})[7], material particulado fino respirable ($MP_{2,5}$)[8], dióxido de azufre (SO_2)[9], monóxido de carbono (CO)[10], ozono troposférico (O_3)[11], dióxido de nitrógeno (NO_2)[12] y plomo (Pb) en el aire[13].

Estas normas, además, procuran ser parámetro para definir las zonas saturadas, correspondientes a "aquellas zonas geográficas en que uno o más normas de calidad se encuentren sobrepasadas"[14]. A partir de esta directriz e institucionalidad ambiental vigente, se registran a lo largo del territorio nacional las siguientes zonas saturadas:

- comuna de San Pablo y por la macrozona centro-norte de la Región de los Lagos[15], saturada por $MP_{2,5}$,
- provincia de Quillota y las comunas de Catemu, Panquehue y Llaillay de la provincia de San Felipe de Aconcagua[16], saturada por MP_{10},
- región Metropolitana de Santiago[17], saturada por MP_{10}, $MP_{2,5}$ y O_3,
- la ciudad de Coyhaique y su zona circundante[18], saturada por $MP_{2,5}$,

[6] Letra n) del art. 2° de la Ley N°19.300; "aquella que establece los valores de las concentraciones y períodos, máximos o mínimos permisibles de elementos, compuestos, sustancias, derivados químicos o biológicos, energías, radiaciones, vibraciones, ruidos o combinación de ellos, cuya presencia o carencia en el ambiente pueda constituir un riesgo para la vida o la salud de la población".
[7] D.S. N°59/1998, modificado por D.S. N°45/2001, ambos del Ministerio Secretaría General de la Presidencia.
[8] D.S. N°12/2010 del Ministerio del Medio Ambiente.
[9] D.S. N°104/2018 del Ministerio del Medio Ambiente.
[10] D.S. N°115/2002 del Ministerio Secretaria General de la Presidencia.
[11] D.S. N°112/2002 del Ministerio Secretaria General de la Presidencia.
[12] D.S. N°114/2002 del Ministerio Secretaria General de la Presidencia.
[13] D.S. N°136/2000 del Ministerio Secretaria General de la Presidencia.
[14] Letra n) del art. 2° de la Ley N°19.300. Correspondiente a los valores indicadas en las normas primarias de calidad ambiental, en el caso del aire, se definen de la nota al pie N°2 al 8.
[15] D.S. N°24/2020 del Ministerio del Medio Ambiente.
[16] D.S. N°107/2018 del Ministerio del Medio Ambiente.
[17] D.S. N°67/2014 del Ministerio del Medio Ambiente se declaró zona saturada por $MP_{2,5}$, mientras que la declaración por saturación por Ozono y MP_{10} se mantienen vigente desde el D.S. N°131/1996 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia.
[18] D.S. N°15/2016 del Ministerio del Medio Ambiente.

- valle central de la Provincia de Curicó[19], región del Maule, saturada por $MP_{2,5}$,
- Concepción Metropolitano[20], saturada por $MP_{2,5}$,
- comuna de Los Ángeles[21], saturada por MP_{10} y $MP_{2,5}$,
- comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví[22], saturadas por $MP_{2,5}$,
- comuna de Valdivia[23], saturada por MP_{10} y $MP_{2,5}$,
- comunas de Temuco y Padre Las Casas[24], saturadas por $MP_{2,5}$ y MP_{10},
- comunas de Chillán y Chillán Viejo[25], saturadas por MP_{10} y $MP_{2,5}$,
- comuna de Osorno[26]; saturada por MP_{10} y $MP_{2,5}$,
- comunas de Talca y Maule[27], saturada por MP_{10},
- ciudad de Calama y su área circundante[28], saturada por MP_{10},
- localidad de Andacollo y sectores aledaños[29], saturadas por MP_{10},
- valle central de la región del Libertador General Bernardo O´Higgins[30], saturada por MP_{10} y $MP_{2,5}$,
- zona circundante a la ciudad de Tocopilla[31], región de Antofagasta, saturada por MP_{10},
- zona circundante a la Fundición de Potrerillos[32], ubicada en la comuna de Diego de Almagro, región de Atacama, saturada por MP y SO_2,
- zona circundante a la Fundición Caletones[33], región del Libertador General Bernardo O´Higgins, saturadas por MP y SO_2,
- zona circundante al complejo industrial Ventanas[34], región de Valparaíso, saturada por MP y SO_2,
- zona circundante a la Fundición Hernán Videla Lira[35], región de Atacama, saturada por SO_2.

La saturación de zonas geográficas está mencionada en el **Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental**[36] (en adelante RSEIA), específicamente en el literal h) del artículo 3° de

[19] D.S. N°53/2015 del Ministerio del Medio Ambiente.
[20] D.S. N°15/2015 del Ministerio del Medio Ambiente.
[21] D.S. N°11/2015 del Ministerio del Medio Ambiente.
[22] D.S. N°10/2015 del Ministerio del Medio Ambiente.
[23] D.S. N°17/2014 del Ministerio del Medio Ambiente.
[24] D.S. N°35/2005 del Ministerio Secretaría General de la República y D.S. N°02/2013 del Ministerio del Medio Ambiente.
[25] D.S. N°36/2012 del Ministerio del Medio Ambiente.
[26] D.S. N°27/2012 del Ministerio del Medio Ambiente.
[27] D.S. N°12/2010 del Ministerio Secretaría General de la República.
[28] D.S. N°57/2009 del Ministerio Secretaría General de la República.
[29] D.S. N°08/2009 del Ministerio Secretaría General de la República.
[30] Declaración de saturación por MP_{10} emitida en el D.S. N°07/2009 del Ministerio Secretaría General de la República, mientras que por $MP_{2,5}$ fue emitida en el D.S. N°42/2017 del Ministerio del Medio Ambiente
[31] D.S. N°74/2008 y D.S. N°50/2007, ambos del Ministerio Secretaría General de la República.
[32] D.S. N°18/1997 del Ministerio Secretaría General de la República.
[33] D.S. N°179/1994 del Ministerio Secretaría General de la República.
[34] D.S. N°346/1994 del Ministerio Secretaría General de la República.
[35] D.S. N°255/1993 del Ministerio Secretaría General de la República.
[36] D.S. N°40/2012 del Ministerio del Medio Ambiente.

ingreso de proyecto al sistema, que estipula: "proyectos industriales o inmobiliarios que se ejecuten en zonas declaradas latentes o saturadas". Por otro lado, el Título II[37] del RSEIA, específicamente el artículo 5°, plantea la forma de evaluar el riesgo para la salud de la población, lo que configura los **efectos, características y circunstancias** (en adelante ECC) de la letra a) del artículo 11 de la Ley N°19.300. Respecto a esta evaluación, la letra a) del artículo 5° del RSEIA estipula lo siguiente:

a. La superación de los valores de las concentraciones y períodos establecidos en las normas primarias de calidad ambiental o el aumento o disminución significativos, según corresponda, de la concentración por sobre los límites establecidos en éstas.

En este literal se explicita que se evaluará "el aumento o disminución significativos, según corresponda, de las concentraciones por sobre los límites de las normas primarias de calidad ambiental nacionales vigentes", por lo tanto, el RSEIA deja a entrever que existe un aumento (o disminución) que no es significativo en cuanto a las concentraciones que aporte un proyecto o actividad a una zona saturada. Este aumento, o disminución, indica que durante la tramitación ambiental de proyectos o actividades en el SEIA hay un grado de perjuicio para la salud de la población que no configura los ECC de la letra) del artículo 11° de la ley N°19.300.

Complementariamente, la "**Guía de Evaluación de Impacto Ambiental Riesgo para la Salud de la Población**" (SEA, 2012) estipula lo antes descrito como aumento del "riesgo pre-existente"[38], lo cual refiere a que la zona donde se emplazará el proyecto o actividad se encuentra saturada por el o los mismos contaminantes que el proyecto emitirá. Se denomina como "pre-existente" ya que esta guía indica que para que exista un riesgo (impacto[39]) para la salud de las personas, se deben conjugar un peligro y la exposición de un receptor a dicho peligro, definiendo para ello peligro como *"capacidad intrínseca de una sustancia, agente, objeto o situación de causar un efecto adverso sobre un receptor"*. Este enunciado hace alusión directa a la definición de contaminación[40] descrita en la Ley N°19.300 y bajo las cuales se configuran las "Normas Primarias de Calidad Ambiental", cuyos preceptos comunes son "la protección de la salud de los efectos adversos de los contaminantes establecidos en dichas normas". Por tanto, es consecuente expresar que cualquier zona saturada cuenta con un nivel de riesgo que presenta efectos adversos por sobre los limitados por la norma establecida.

[37] Generación o presencia de efectos, características o circunstancias que dan origen a la necesidad de presentar un estudio de impacto ambiental.
[38] Véase apartado 5.2.3 de la guía indica.
[39] El Ordinario N°180972, del 31 de agosto de 2018, del SEA imparte instrucciones en relación con la distinción del concepto de riesgo e impacto en el marco del SEIA, indicando que el riesgo para la salud configura como un impacto, producto de la emisión, descarga o disposición de los contaminantes producto de la ejecución del proyecto.
[40] Letra c) del Artículo 2° de la Ley N°19.300 que indica: "Contaminación: todo elemento, compuesto, sustancia, derivado químico o biológico, energía, radiación, vibración, ruido, luminosidad artificial o una combinación de ellos, cuya presencia en el ambiente, en ciertos niveles, concentraciones o períodos de tiempo, pueda constituir un riesgo a la salud de las personas, a la calidad de vida de la población, a la preservación de la naturaleza o a la conservación del patrimonio ambiental".

Sin embargo, en el marco del SEIA no se ha definido ningún lineamiento cualitativo ni cuantitativo respecto de cuál es el nivel que configure un aumento (o disminución) significativa del aporte de un proyecto respecto a una zona saturada, lo que se refleja en la diferencia de criterios aplicados en proyectos a lo largo del país en relación con la evaluación de proyectos. La Figura 1-1 presenta la recopilación de distintos proyectos evaluados y aprobados en zonas declaradas saturadas por MP10 a lo largo del país y su análisis de significancia de la letra a) del artículo 5 del RSEIA, presentando el aumento porcentual de las concentraciones en los receptores analizados respecto de la norma. Cabe indicar que, de los proyectos presentados, ninguno indicó la presencia de ECC sobre el riesgo para la salud de la población. De la Figura 1-1 se evidencia la diferencia de valores percibidos como tolerables o que no configuran un impacto significativo de las concentraciones respecto a cada zona saturada por MP_{10}.

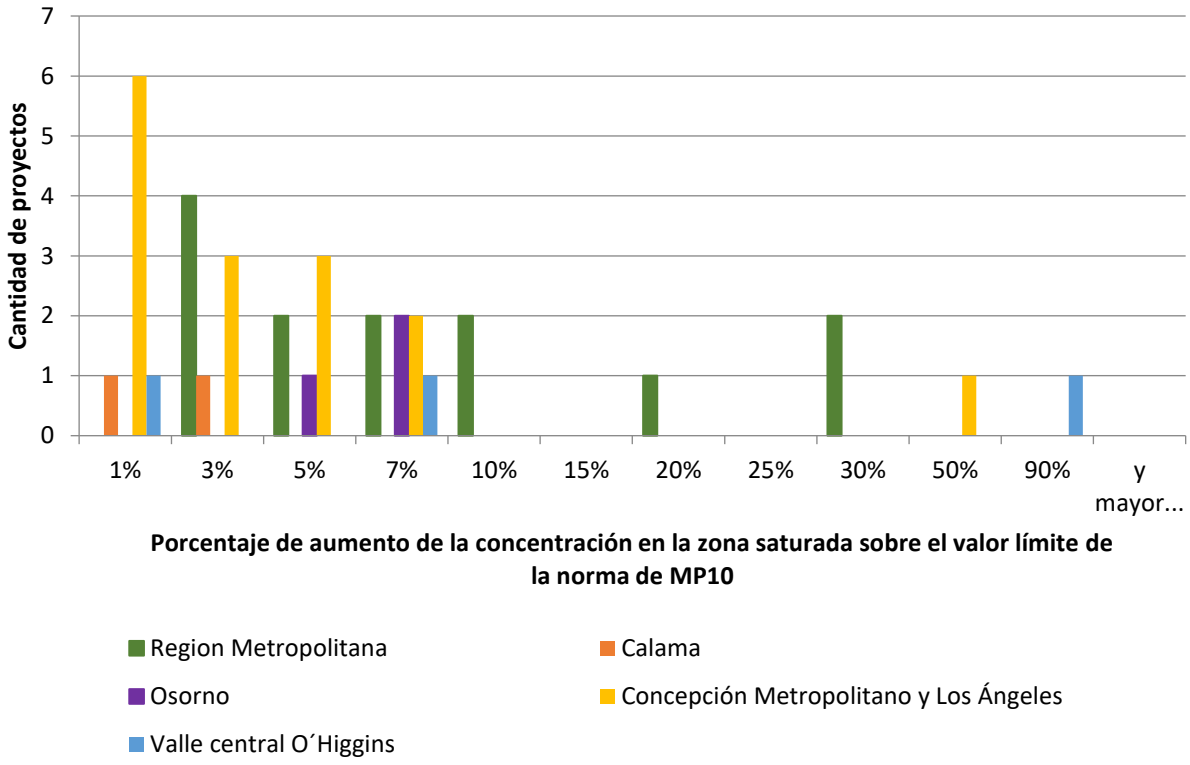


Figura 1-1 Histograma evaluación del riesgo a la salud en zonas saturadas por MP10

Fuente: TdR, elaborado en base a una muestra de proyectos presentados a evaluación y aprobados en el marco del SEIA[41]

[41] Se analizó una muestra de alrededor de 100 proyectos aprobados en las regiones con zonas declaradas saturadas, de cuyo resultado se obtuvieron 36 proyectos que presentaron modelación refinada de MP10 y con cuyos datos se construyó la gráfica.

Bajo los antecedentes expuestos, surgen una serie de interrogantes respecto a la evaluación del riesgo en zonas saturadas; ¿cuándo el incremento de las concentraciones de un proyecto es considerado como impacto significativo en una zona saturada?; ese incremento ¿deberá reconocer diferencias entre los niveles de superación de la norma a lo largo del país[42]?, en el caso de la saturación por gases, ¿qué parámetros se debiesen considerar?

[42] Existen zonas a lo largo del país que presentan valores superiores al 50% del límite de la norma de MP10 o MP2,5.

2. Objetivos del estudio

2.1 Objetivo general

Proponer criterios que sean aplicables en el marco del SEIA, al momento de evaluar la significancia del impacto de emisiones atmosféricas (magnitud, duración y extensión) de contaminantes normados generados por proyectos o actividades emplazados en zonas saturadas o en estado de saturación[43] sobre el riesgo para la salud de la población. Estos contaminantes corresponden a los criterios de la normativa chilena[44].

2.2 Objetivos específicos

1. Estado del arte internacional: Revisar y analizar el estado del arte a nivel internacional respecto de criterios de evaluación de la significancia del efecto de contaminantes atmosféricos en zonas saturadas o en estado de saturación en el marco de la evaluación ambiental o tramitación de permisos ambientales de proyectos o actividades.

2. Estudios nacionales e internacionales de afectación a la salud: Revisar la información nacional e internacional de estudios toxicológicos, epidemiológicos y ensayos clínicos respecto a los efectos adversos de contaminantes criterio sobre la salud de las personas. Al respecto, identificar parámetros o variables que sean aplicables a la realidad nacional y al marco de evaluación del SEIA.

3. Diagnóstico de evaluación en el marco del SEIA: Identificar y analizar la forma actual de evaluación del denominado "riesgo pre-existente" y de los "aportes significativos" en las zonas saturadas o en estado de saturación del país en el marco del SEIA.

4. Aplicación en el marco del SEIA: En consideración del marco normativo actual, analizar las posibilidades de incluir criterios[45] de evaluación de la significancia del impacto de los contaminantes atmosféricos normados en zonas saturadas, o en estado de saturación,

[43] Entiéndase como aquellas zonas en las que las estaciones de monitoreo con representatividad poblacional indican que los niveles del contaminante especifico superan los límites establecidos en la norma primaria de calidad ambiental.
[44] Contaminantes que cuentan con normas primarias de calidad del aire nacionales vigentes.
[45] Estos criterios deberán ser construidos en base a la información levantada en los objetivos anteriores, pudiendo tener base en los estudios epidemiológicos, toxicológicos o clínicos existentes, realidades internacionales aplicadas al contexto nacional, tanto en la descripción de la salud como en el marco del SEIA, en base estadística o en base a cualquier parámetro que sea demostrable. Además, es esperable que cada criterio sea construido para los contaminantes criterios nacionales, en relación con sus efectos adversos, incluyendo tanto la variable de la magnitud como duración del impacto generado. Por último, y a modo referencial, se solicita trazar líneas generales para los contaminantes Arsénico (As) y Compuestos Orgánicos Volátiles (COVs), debido a la actual elaboración de sus Normas Primarias de Calidad, del mismo modo, explicitar los efectos en los criterios respecto a la actualización de la norma de MP, actualmente en trámite.

que permitan agilizar la funcionalidad del SEIA, al mismo tiempo que, se complementan con los restantes instrumentos de gestión ambiental disponibles en la legislación chilena.

2.3 Alcance del presente informe

Este informe final del presente proyecto, de acuerdo con las bases técnicas de la licitación, contiene la metodología y resultados asociadas al desarrollo de todos los objetivos específicos del numeral 4 de las Bases Técnicas.

3. Estado del arte internacional

En esta sección se presentan los resultados de la revisión del estado del arte a nivel internacional respecto de criterios de evaluación de la significancia del efecto de contaminantes atmosféricos en zonas saturadas o en estado de saturación en el marco de la evaluación ambiental o tramitación de permisos ambientales de proyectos o actividades.

En primer lugar, se presentan los criterios identificados en la normativa internacional, con detalle por país y contaminante (ver Sección 3.1), los que se resumen brevemente en la Sección 3.1.7. En la Sección 3.2 se presentan los antecedentes de la reunión realizada con el equipo técnico del SEA para revisar estos criterios, y finalmente en la Sección 3.3 se presenta la recomendación preliminar asociada a los resultados de la revisión realizada.

3.1 Revisión de criterios de normativa internacional en la evaluación ambiental de contaminantes en zonas que se encuentren sobrepasadas

Se realizó una revisión de la normativa internacional en búsqueda de criterios de evaluación de la significancia del efecto de contaminantes atmosféricos en zonas saturadas o en estado de saturación en el marco de la evaluación ambiental o tramitación de permisos ambientales de proyectos o actividades. Se revisaron las normativas de al menos los Estados listados en el artículo 11° del RSEIA. En esta revisión fue posible identificar criterios para EE.UU. (ver Sección 3.1.1), el Reino Unido (ver Sección 3.1.2), la Unión Europea (ver Sección 3.1.3), Países Bajos (Sección 3.1.4), Nueva Zelanda (Sección 3.1.5) y Australia (Sección 3.1.6).

En la siguiente Tabla 3-1 se resumen los antecedentes encontrados para los países del listado del artículo 11° del RSEIA en que no fue posible identificar criterios del tipo que se buscaba encontrar en esta revisión. En este sentido, se presentan ciertos antecedentes identificados que parecían promisorios, sin embargo, finalmente no fue posible determinar criterios replicables al caso chileno a partir de su revisión.

Tabla 3-1 Antecedentes de los Estados en los cuales no fue posible encontrar criterios replicables de evaluación de la significancia del efecto de contaminantes atmosféricos en zonas saturadas para la evaluación ambiental de proyectos

País	Proceso administrativo	Metodologías de evaluación ambiental	Relación con las normas ambientales del país	Tipología proyectos en los que aplica
Alemania	Elaboración de permisos ambientales, donde la autoridad que los gestiona puede ser distrital o municipal.	Es posible otorgar permisos a alguna fuente que busque localizarse en una región que exceda un valor de emisión si se toman medidas adicionales que aseguren futuro cumplimiento (ej. cambios en el proceso, uso de materiales diferentes de combustión), o si se asegura que el valor no será sobrepasado debido al cierre o modificación de otras instalaciones.	Se establecen valores de emisión para resguardar la salud humana, fijados para benceno, plomo, MP10, SO_2, NO_2 y tetracloroeteno.	S/I
Argentina	Elaboración de una Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) y Estudio de Impacto Ambiental (EsIA) (Ley Nº 25.675).	En la elaboración de un EsIA se debe describir y medir la calidad del aire previa a la instalación del proyecto, para luego medir el impacto potencial de este. Dentro de la Ley Nº 20.284 se establecen las normas de calidad del aire. En la evaluación de la calidad del aire se consideran contaminantes primarios y secundarios, tipo de fuente, características, magnitud, duración, frecuencia, condiciones atmosféricas y receptores sensibles. No se indica cómo proceder en caso de que en una zona se esté sobrepasando la norma.	Los parámetros por monitorear son aquellos vinculados a las emisiones del proyecto, especialmente los que se encuentren regulados.	Todo proyecto que sea susceptible de degradar el ambiente o afectar la calidad de vida de la población, en forma significativa.
Brasil	A nivel nacional se exige que los proyectos que pueden causar un impacto significativo en el ambiente deben realizar un estudio de impacto ambiental. Cada estado puede tener exigencias diferentes con respecto al contenido y procedimiento de concesión de licencias.	En las resoluciones Nº 382 y Nº 436 se establecen los límites máximos de emisión de fuentes fijas, medidos en mg/m^3N. En la resolución Nº 382 se menciona que las agencias ambientales estatales que tengan mayores niveles de contaminación pueden imponer exigencias más estrictas.	En la resolución Nº 491 se establecen los estándares de calidad para CO, Pb, NO_2, MP_{10}, $MP_{2,5}$, O_3 y SO_2 y PTS.	Normativa de emisiones: Fuentes fijas.
Canadá	Se establecen requerimientos específicos para las emisiones industriales, diferenciando por tipo de industria (calderas, cemento, celulosa, etc.). El cumplimiento de los requerimientos permite su funcionamiento.	S/I	Estándares de calidad para $MP_{2,5}$, O_3, SO_2 y NO_2.	S/I
España	Elaboración de un EsIA a ser revisado por el Órgano Ambiental. Para su elaboración, se suscribe a las directivas de la UE.	Existe un número máximo de veces en que los valores límite puede ser superados en cierto período de tiempo, dependiendo del contaminante. Estos	Valores límites para SO_2, NO_2, Pb, As, Cd, Ni, MP_{10}, $MP_{2,5}$, benceno, CO, O_3.	S/I

		límites están fijados solo para SO_2, NO_2, MP10 y O_3.		
México	Evaluación de conformidad de la Norma Oficial Mexicana 172-SEMARNAT-2019, la que establece índices de "Aire y Salud" para contaminantes atmosféricos.	S/I	Índices de "Aire y salud" para O_3, $MP_{2,5}$, MP_{10}, SO_2, NO_2.	S/I
Italia	Cualquier fuente de emisión, debe pedir un permiso para ejecutarse. Los permisos para fuentes menores de contaminación los dan las autoridades locales de cada región. Sin embargo, hay algunas fuentes que no necesitan autorización.	Para establecer los límites de emisión para las fuentes se utilizan las emisiones asociadas a la Mejor Tecnología Disponible (*Best Available Technique*).	En el Decreto Legislativo 152, Parte 5, Título 1 se menciona que los planes de descontaminación pueden establecer límites de emisión más estrictos que los planteados en el Decreto.	Las fuentes afectas se describen en el Artículo 269 en el Decreto Legislativo 152 Parte 5, Título 1.
Japón	Emisiones son reguladas a través de la Ley de control de la contaminación del aire (1968).	N/A	Se encontraron estándares de emisiones para los contaminantes: benceno, SOx, NOx, $MP_{2,5}$, CO, Pb y Polvo. Se distingue entre plantas nuevas y antiguas.	Fábricas y sitios comerciales.
Suecia	Se adhiere a los estándares de la UE.	S/I	Estándares para SO_2, NO_x, COV, NH_3, $MP_{2,5}$.	S/I
Suiza	Las leyes suizas no prevén un permiso ambiental general y no existe un catálogo general de proyectos o actividades sujetos a aprobación ambiental.	S/I	Estándares para MP_{10}, $MP_{2,5}$, CO, SO_2, NO_2 y O_3.	S/I

S/I: Sin información relativa a los objetivos de la revisión.
N/A: No aplica

Fuente: Elaboración propia

Del mismo modo, no fue posible encontrar criterios para todos los contaminantes regulados con normas primarias de calidad ambiental en Chile. En particular, no se hallaron antecedentes para el caso del Pb.

3.1.1 EE.UU.

A continuación, se presentan los documentos de Estados Unidos (EE.UU.) en que fue posible identificar criterios de evaluación de la significancia del efecto de contaminantes atmosféricos en zonas saturadas para la evaluación ambiental de proyectos.

3.1.1.1 Guía sobre los niveles de impacto significativo del O_3, $MP_{2,5}$, SO_2 y NO_2 en el programa de permisos PSD

El Congreso de EE.UU. diseñó la **Ley de Aire Limpio** (*Clean Air Act*) con el objetivo de proteger la salud y el bienestar público producto de los efectos adversos de diferentes tipos de contaminación en el aire causada por una amplia gama de fuentes. Gran parte de su estructura básica se promulgó en el año 1970 y se realizaron importantes revisiones en 1977 y 1990. Esta requiere que la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, cuyas siglas en inglés corresponden a USEPA (*Environmental Protection Agency*), elabore estándares nacionales para ciertos contaminantes atmosféricos basados en la ciencia y tecnología más reciente. También exige que los gobiernos estatales, locales, tribales y federales trabajen en asociación para limpiar el aire (USEPA, n.d.-e).

En este contexto es que para que una entidad pueda construir y operar una nueva fuente de emisión que genere alguno de los contaminantes normados en EE.UU. debe cumplir con un **Permiso de revisión de nueva fuente**, cuyas siglas en inglés corresponden a **NSR** (*New Source Review*). Los NSR son documentos legales que deben seguir los propietarios y operadores de las instalaciones y especifican qué construcción está permitida, límites de emisión y, a menudo, cómo se debe operar la fuente. La USEPA emite este tipo de permiso en algunos casos, pero la mayoría son emitidos por agencias estatales o locales que regulan el control de la contaminación del aire (USEPA, n.d.-g) .

Los estados pueden desarrollar requisitos y procedimientos únicos de NSR adaptados a sus necesidades de calidad del aire siempre que el programa sea al menos tan estricto como los requisitos de la USEPA, además deben ser aprobados en el Plan de Implementación Estatal, cuyas siglas corresponden a SIP (*State Implementation Plans*) por la USEPA (USEPA, n.d.-g).

Existen tres tipos de requisitos de NSR, los que no son excluyentes, ya que una fuente puede tener que cumplir uno o más de estos:

1. Permisos de Prevención de Deterioro Significativo (PSD): se requieren para nuevas fuentes de gran magnitud o cuando se realiza una modificación importante[46] en áreas

[46] Considera cualquier fuente o grupo de fuentes localizadas de manera contigua en un área y bajo control común, que emiten o tienen el potencial de emitir 10 toneladas por año o más de cualquier contaminante atmosférico peligroso, o 25 toneladas por año o más de cualquier combinación de contaminantes atmosféricos peligrosos (USEPA, n.d.-c).

que cumplen con los Estándares Nacionales de Calidad del Aire Ambiental, cuyas siglas en ingles corresponden a NAAQS (*National Ambient Air Quality Standards*).

2. Permisos NSR por incumplimiento: se requieren para nuevas fuentes importantes o cuando una fuente importante realiza una gran modificación en áreas que no cumplen con uno o más NAAQS.
3. Permisos de fuentes menores: para contaminantes de fuentes estacionarias que no requieren permisos de PSD o de incumplimiento de NSR.

Los **NAAQS,** mencionados en estos requisitos, son las normas establecidas por la USEPA para los contaminantes presentes en el aire exterior, considerados dañinos para la salud pública y el medio ambiente, y que provienen de numerosas y diversas fuentes. Hay estándares primarios (protegen salud humana) y secundarios (protegen bienestar público, lo que incluye animales, vida silvestre, agua y visibilidad) (USEPA, n.d.-d). Esta clasificación es equivalente a la vigente hoy en Chile, ya que en el artículo 32 de la Ley N°19.300 se indica que existen normas de calidad ambiental primarias y secundarias. Las normas de calidad primarias son aquellas que tienen como objetivo proteger la salud de la población humana dentro del territorio nacional; mientras las normas de calidad secundaria tienen por objetivo proteger o conservar el medio ambiente o la naturaleza y son de carácter local y no necesariamente nacional. Los contaminantes criterio abordados en los NAAQS son: monóxido de carbono (CO), plomo (Pb), dióxido de nitrógeno (NO_2), ozono (O_3), dióxido de azufre (SO_2), MP_{10} y $MP_{2,5}$ (USEPA, n.d.-d).

Los **PSD** son un tipo de NSR y, como indica su nombre, se aplican a nuevas fuentes o modificaciones importantes en fuentes existentes de contaminantes cuando el área donde se encuentra cumple o no es clasificable[47] para los NAAQS (USEPA, n.d.-i).

El propósito de un PSD no es evitar que las fuentes aumenten las emisiones, sino que está diseñado para:

- Proteger la salud y el bienestar públicos,
- Preservar, proteger y mejorar la calidad del aire en parques nacionales, áreas silvestres nacionales, monumentos nacionales, costas nacionales y otras áreas de especial valor natural, recreativo, escénico o histórico nacional o regional,
- Asegurar que el crecimiento económico ocurra de una manera consistente con la preservación de los recursos de aire limpio existentes,
- Asegurar que cualquier decisión para permitir una mayor contaminación del aire en cualquier área a la que se aplique esta sección se tome solo después de una evaluación cuidadosa de todas las consecuencias de tal decisión y después de oportunidades de procedimiento adecuadas para la participación pública informada en el proceso de toma de decisiones.

Para la obtención de un PSD, se requiere lo siguiente:

- Instalación de la "Mejor Tecnología de Control Disponible" (BACT),

[47] Corresponde a un área para la cual la EPA no puede determinar el estado de la calidad del aire con la información disponible.

- Análisis de la calidad del aire,
- Análisis de impactos adicional,
- Participación pública.

Un concepto relevante en cuanto a estos permisos es el **Incremento PSD**. Este corresponde a la cantidad de contaminación que se permite que aumente en un área, evitando que la calidad del aire en áreas de cumplimiento se deteriore al nivel establecido por los NAAQS. Por una parte, el NAAQS es un "techo" de concentración máxima permitida. Por otra parte, un incremento de PSD es el aumento máximo en la concentración que se permite que ocurra por encima de la concentración de referencia para un contaminante, la cual se define para cada contaminante y, en general, es la concentración ambiental existente en el momento en que se presenta la primera solicitud completa de permiso PSD que afecta el área. Se dice que ocurre un deterioro significativo cuando la cantidad de nueva contaminación excedería el incremento de PSD aplicable. Sin embargo, es importante señalar que la calidad del aire no puede deteriorarse más allá de la concentración permitida por los NAAQS aplicables (USEPA, n.d.-i).

Otro concepto relevante de esclarecer es el término **Nivel de Impacto Significativo,** cuyas siglas en inglés corresponden a **SIL** (*Significant Impact Level*). Los SIL son concentraciones definidas de contaminantes criterio en el aire ambiental que se consideran intrascendentes en comparación con los NAAQS (USEPA, 2018a).

En este contexto es que la USEPA elaboró en 2010 dos documentos, el primero de ellos titulado "*Guidance Concerning the Implementation of the 1-hour NO_2 NAAQS for the Prevention of Significant Deterioration Program*" y el segundo "*Guidance Concerning the Implementation of the 1-hour SO_2 NAAQS for the Prevention of Significant Deterioration Program*". En ambos se definen valores interinos para el SIL de NO_2 y SO_2, respectivamente. Luego, en 2018 se elaboró un tercer documento titulado "*Guidance on Significant Impact Levels for Ozone and Fine Particles in the Prevention of Significant Deterioration Permitting Program*".

En relación con los documentos mencionados, la USEPA ha proporcionado análisis técnicos, legales y de políticas que las autoridades de permisos pueden adoptar para respaldar el uso de los SILs, tal que realicen la demostración requerida en determinadas acciones de permisos de PSD. El uso de SIL puede ayudar a satisfacer los requisitos de PSD al tiempo que acelera el proceso de permisos y conserva los recursos para los solicitantes de permisos y las autoridades que los otorgan (USEPA, 2018a).

Cuando un solicitante de un PSD demuestra a través de modelos de calidad del aire que el impacto proyectado en la calidad del aire de una fuente propuesta para un contaminante particular es o no es significativo, la USEPA cree que existe una base analítica y legal válida en la mayoría de los casos para que la autoridad concluya que la fuente propuesta no causará o contribuirá a una violación de un NAAQS o incremento de PSD para ese contaminante. **Las autoridades y los solicitantes de permisos pueden demostrar que la fuente propuesta no tendrá un impacto significativo en la calidad del aire, optando por utilizar los valores de SILs**

(valores de concentración de la calidad del aire) como una herramienta de demostración de cumplimiento. De esta manera, la autoridad pertinente puede concluir si la fuente propuesta causará o no una violación de un NAAQS o incremento de PSD para ese contaminante (USEPA, 2018a).

Uno de los objetivos del desarrollo de un SIL como herramienta de demostración de cumplimiento es garantizar un equilibrio adecuado entre el mantenimiento de la calidad del aire y la optimización del proceso de permisos PSD. Las autoridades pueden concluir que las emisiones de una fuente cuyo impacto se proyecta bajo el nivel del SIL no serán responsables de violar el NAAQS (USEPA, 2018a).

Junto con la tercera Guía mencionada, en donde se fijan SILs para O_3 y $MP_{2,5}$, la USEPA presenta dos documentos que la complementan, estos son el documento legal, "*Legal Memorandum, Application of Significant Impact Levels in the Air Quality Demonstration for Prevention of Significant Deterioration Permitting under the Clean Air Act*" (USEPA, 2018b), en el cual se presentan los detalles para que las autoridades apliquen correctamente los SILs, y el documento técnico, "*Technical Basis for the EPA's Development of the Significant Impact Thresholds for PM2.5 and Ozone*" (USEPA, 2018c), donde se explica todo el procedimiento realizado para determinar los valores de los criterios correspondientes.

La USEPA estipula que **los valores de los SILs pueden seleccionarse de un análisis estadístico de la variabilidad de la calidad del aire, utilizando datos de la red de monitoreo ambiental** de EE.UU. Existe una variabilidad inherente en la calidad del aire en el área que rodea un sitio de monitoreo, ya que las condiciones meteorológicas son fluctuantes y hay cambios diarios en las operaciones de las fuentes de contaminación en un área. Esta variabilidad se puede caracterizar mediante la aplicación de un marco estadístico bien establecido para cuantificar la incertidumbre (USEPA, 2018a).

En el documento técnico mencionado, se especifica que para determinar los SILs utilizan el enfoque estadístico *Bootstrapping*. Este es un método que cuantifica el grado de variabilidad de la calidad del aire en un sitio de monitoreo ambiental y permite determinar intervalos de confianza (IC) (USEPA, 2018c). En otras palabras, el método de *bootstrapping* permite analizar estadísticamente cuánto varía el Valor de Cumplimiento[48] de un contaminante en un año y el promedio de tres años considerando un Intervalo de Confianza (IC), donde la USEPA selecciona un IC den 50%.

El análisis *bootstrap* de la USEPA generó estimaciones para los IC del 25%, 50%, 68%, 75% y 95% para así caracterizar el rango de la variabilidad inherente y proporcionar opciones para seleccionar un nivel apropiado de **"impacto insignificante"** que se aplicará para determinar cada

[48] Medida estadística o el resumen de los datos monitoreados en los años más recientes (uno a tres años). En otras palabras, es la medida descrita en la normativa de calidad del aire para evaluar el nivel de concentración de un contaminante.

SIL. Es importante destacar que este nivel de impacto insignificante lo establece la USEPA y es para evaluar de manera estadística la variabilidad intrínseca dada por las emisiones y la meteorología propia de cada lugar, y no por un nivel de riesgo aceptable para la salud. La aplicación tradicional de las pruebas de significación estadística busca determinar si una desviación del valor base es significativa, en lugar de no significativa, que es como se usa en el estudio. Para tomar esta determinación, normalmente se seleccionan IC más grandes (por ejemplo, 90-99%, lo que da como resultado un alto nivel de confianza de que una desviación del valor base es realmente significativa). En la práctica, el IC más pequeño que podría considerarse para una determinación de significación similar sería el IC del 68%, que corresponde a una desviación estándar de la media para una muestra distribuida normalmente. Por lo tanto, cualquier desviación mayor que los límites del IC del 68% podría identificarse tradicionalmente como una desviación significativa de la media. Para aplicar este tipo de análisis al programa PSD se buscó para cada NAAQS un valor por debajo del cual se puede concluir que el cambio en la calidad del aire **"no es estadísticamente significativo"** (es decir, que no habrá una diferencia notable en la calidad del aire después de la nueva fuente comienza a funcionar). Siguiendo esto, los IC utilizados para identificar un valor que no es estadísticamente significativo deben estar por debajo del 68%, y en este caso se eligió un IC del 50% como la estadística de referencia del análisis de arranque para representar los SIL recomendados en PSD que permiten el ozono y $MP_{2,5}$ NAAQS (USEPA, 2018c).

En la Tabla 3-2 y la Tabla 3-3 , se presentan los valores de SILs para $MP_{2,5}$ y O_3 propuestos por la USEPA.

Tabla 3-2 Valores de SIL recomendados para Ozono y $MP_{2,5}$ NAAQS

Contaminante criterio (nivel NAAQS)	Concentración SIL
O_3 8 horas (70 ppb)	1,0 ppb
$MP_{2,5}$ 24 horas (35 µg/m^3)	1,2 µg/m^3
$MP_{2,5}$ Anual (12 µg/m^3 o 15 µg/m^3)	0,2 µg/m^3

Fuente: (USEPA, 2018a) Tabla 1

Tabla 3-3 Valores SIL recomendados para $MP_{2,5}$ incrementos PSD

Contaminante criterio (periodo promedio)	Incremento PSD concentración SIL		
	Clase I	Clase II	Clase III
$MP_{2,5}$ (24 horas)	0,27 µg/m^3	1,2 µg/m^3	1,2 µg/m^3
$MP_{2,5}$ (Anual)	0,05 µg/m^3	0,2 µg/m^3	0,2 µg/m^3

Fuente: (USEPA, 2018a) Tabla 2

Donde las clases mencionadas en la Tabla 3-3 se clasifican de la siguiente manera:

- Áreas de Clase I: están protegidas por el programa de Prevención de Deterioro Significativo (PSD) e incluyen parques nacionales, áreas silvestres nacionales, monumentos nacionales, costas nacionales y otras áreas de especial valor natural, recreativo, escénico o histórico nacional o regional (USEPA, n.d.-a)

- Áreas de Clase II: Áreas de cumplimiento[49] que no están industrializadas ni cumplen con los requisitos específicos para su clasificación como áreas de Clase I. Están protegidos por el programa de Prevención de Deterioro Significativo (PSD) (USEPA, n.d.-b). La mayoría de las áreas están definidas por esta clase y permite mayores emisiones que en la Clase I (USEPA, 2018a).
- Área de Clase III: Áreas de cumplimiento industrializadas. Están protegidas por el programa de Prevención de Deterioro Significativo (PSD) (USEPA, n.d.-c). Actualmente no hay áreas definidas con esta clase, pero permite aún más emisiones en comparación a las otras clases (USEPA, 2018a).

Se puede notar que el criterio utilizado depende del periodo promedio de medición. El SIL de O_3 corresponde al 1,43% del estándar NAAQS, mientras que el de $MP_{2,5}$ (24 horas) es el 3,43% de la norma y el de $MP_{2,5}$ (anual) un 1,50% aproximadamente del NAAQS. Por otro lado, en la Tabla 3-3, se observa que el parámetro es menos exigente para lugares de Clases II y III en comparación con las de Clase I, siendo en el caso de $MP_{2,5}$ (24 horas) 4,44 veces mayor el SIL para áreas de Clase II y III que el de áreas de Clase I, mientras que para $MP_{2,5}$ (anual) esta relación es de 4,00 veces mayor.

3.1.1.1.1 Uso de SILs o similares en algunos estados de EE.UU.

Otro de los aspectos importantes establecidos en las Guías para el uso de SILs tratadas en la sección anterior, es que **las autoridades que otorgan permisos tienen libertad para adherirse a esta metodología o no** (USEPA, 2018a). De esta forma, distintos estados han optado por utilizar los SILs como herramienta para facilitar el otorgamiento de un permiso, mientras que otros han tomado caminos distintos.

De este modo, a la fecha la USEPA ha liberado tres Guías en el uso de SILs para el O_3 y $MP_{2,5}$, SO_2 (2010b) y NO_2 (2010a), pero además en el Título 40 del Código de Regulaciones Federales de EE.UU. (CFR), sección 51.165 (USEPA, 2011), se establecen valores de significancia para distintos contaminantes y períodos de emisión, cuyo objetivo es fijar un límite desde el cual se considera que el impacto de una fuente de gran magnitud o modificación importante causa o contribuye a la violación de un NAAQS. De acuerdo con dicha sección del Código de Regulaciones Federales estadounidense, se considerará que una fuente o una modificación importantes causa o contribuye a una infracción de una norma nacional de calidad del aire cuando dicha fuente o modificación supere, como mínimo, tales niveles de significancia en cualquier localidad que no cumpla o no cumplirá con la norma nacional aplicable.

En la Tabla 3-4 se presenta el valor de los SILs definidos en seis estados de EE.UU. y, para facilitar su comparación, los valores de SILs fijados en las Guías de la USEPA, así como los valores de significancia establecidos en la legislación estadounidense. En su mayoría, los estados se adhieren a los SILs entregados por la USEPA y en la legislación estadounidense, con excepción de

[49] Área de cumplimiento se refiere a que la zona cumple con los estándares de calidad del aire (NAAQS).

Kansas, que para la concentración de NO_2 y SO_2 horaria definida en sus SILs sobrepasa la recomendación de la USEPA en 2,5 y 2,2 µg/m^3, respectivamente. Arizona presenta también una diferencia con respecto al resto de los estados, al proponer el uso de SILs específicos para áreas Clase I y Clase II, en donde los valores para estas últimas coinciden con los propuestos por la USEPA y por la legislación estadounidense[50].

Además, es posible notar en la Tabla 3-4, que no todos los estados revisados utilizan SILs para la totalidad de los contaminantes o periodos para los cuales la USEPA los define[51]. Por ejemplo, en Tennessee solo se utilizan los SILs para $MP_{2,5}$ anual y diario, y para O_3 de 8 horas, con el fin de que un titular pueda calcular una tasa de emisión modelada para precursores, la que permite determinar la necesidad de hacer un análisis acumulativo por parte del titular de la fuente (Permit Modeling Unit et al., 2019). Otro ejemplo es el caso de Texas, en donde el uso de SILs se presenta como una opción posible (y a justificar por parte del titular) en el proceso de demostrar que un proyecto no contribuirá a exceder un NAAQS, y para ello solo se utilizan aquellos SILs entregados por la USEPA, correspondientes a SO_2 horario, NO_2 horario, $MP_{2,5}$ anual y diario, y O_3 para 8 horas (Texas Commission on Environmental Quality, 2019). El resto de los estados utiliza los SILs de forma similar a Texas.

Cabe destacar que, en California, a diferencia de los otros estados incluidos en la Tabla 3-4, no se utilizan SILs y en general, este estado cuenta con sus propias normativas ambientales. Una de las más importantes es el Acto de Calidad Ambiental de California, cuyas siglas corresponden a CEQA (*California Environmental Quality Act*), cuyo objetivo es informar a los tomadores de decisiones y al público sobre los posibles efectos ambientales de las actividades propuestas y prevenir daños ambientales significativos y evitables (Governor's Office of Planning and Research, n.d.). En el CEQA se establece que determinar el impacto que tendrá un proyecto juega un rol crítico en el proceso de otorgar un permiso, y que identificar si un proyecto tendrá o no un impacto significativo en el medioambiente requiere de un cuidadoso juicio por parte de la agencia pública involucrada, el cual debe estar basado en la medida en que sea posible en evidencia científica y datos. Además, una definición férrea de un impacto significativo no siempre es posible, porque, por ejemplo, la significancia en un área urbana puede ser muy distinta a la de un área rural (AEP, 2021).

Por lo anterior, uno de los conceptos que el CEQA introduce es el **umbral de significancia**, que se refiere a un nivel identificable cuantitativo, cualitativo o de desempeño de un efecto ambiental, cuyo incumplimiento implicaría que la agencia ambiental determinará que el impacto es significativo, y, por el contrario, su cumplimiento implicaría un impacto no significativo. Se incentiva a que cada agencia pública del Estado de California desarrolle y publique umbrales de significancia que puedan ser usados en la determinación de la significancia de los efectos

[50] En el caso de Minnesota, las diferencias se encuentran en el segundo decimal, cuando en la EPA el valor propuesto se define con detalle a un decimal, de modo que la diferencia puede deberse a redondeo de los valores únicamente.
[51] En la Tabla 3-4 solo se indican aquellos SILs de contaminantes y periodos que cada estado menciona explícitamente en su documentación, indicando que pueden ser utilizados.

ambientales. Cuando se adopten dichos umbrales, la agencia debe considerar también otros umbrales previamente utilizados o recomendados por otras agencias o por expertos (AEP, 2021).

El criterio de SILs presentado en la Sección 3.1.1.1 se podría aplicar en Chile, para lo cual se requeriría evaluar la pertinencia de utilizar los mismos valores, y la posible necesidad ajustarlos al caso nacional. Esto se debe a que estos valores dependen del lugar, de la variabilidad que hay en el país y las condiciones climáticas y cambios diarios de emisiones de las diversas fuentes en una determinada zona. Se debe considerar, además, que no están hechos para áreas donde no se cumple la norma de calidad del aire.

Tabla 3-4 SILs [µg/m³] por estado y su comparación con el valor definido para EE.UU. a nivel nacional

Contaminante	Periodo	Nevada[1]	Kansas[2]	Texas[3]	Arizona[4] Clase I	Arizona[4] Clase II	Minnesota[5]	Tennesse[6]	EE.UU.	Referencia de SILs para EE.UU.
CO	1 hora	2.000	2.000	-	-	2.000	2.000	-	2.000	(Protection of Environment 40 CFR, 2011)
	8 horas	500	500	-	-	500	500	-	500	(Protection of Environment 40 CFR, 2011)
NO_2	1 hora	7,50	10,00	7,50	-	7,50	7,52	-	7,50	(USEPA, 2010b)
	Anual	1,0	1,0	-	0,1	1,0	1,0	-	1,0	(Protection of Environment 40 CFR, 2011)
SO_2	1 hora	7,80	10,0	7,80	-	7,80	7,86	-	7,80	(USEPA, 2010b)
	3 horas	25	25	-	1	25	25	-	25	(Protection of Environment 40 CFR, 2011)
	24 horas	5	5	-	-	-	5	-	5	(Protection of Environment 40 CFR, 2011)
	Anual	1	1	-	-	-	1	-	1	(Protection of Environment 40 CFR, 2011)
MP_{10}	24 horas	5,0	5,0	-	0,3	5,0	5,0	-	5,0	(Protection of Environment 40 CFR, 2011)
	Anual	-	1	-	-	-	1	-	1	(Protection of Environment 40 CFR, 2011)
$MP_{2,5}$	24 horas	1,20	1,20	1,20	0,07	1,20	1,20	1,20	1,20	(USEPA, 2018a)
	Anual	0,20	0,30	0,20 – 0,30	0,06	0,30	0,30	0,2	0,20 – 0,30	(USEPA, 2018a)
O_3	8 horas	-	-	1,96	-	-	-	1,96	1,96	(USEPA, 2018a)

1 (Nevada Division of Environmental Protection, n.d.)
2 (Kansas Department of Health and Environment & Bureau of Air- Modeling Group, 2016)
3 (Texas Commission on Environmental Quality, 2019)
4 (Air Quality Permit Section et al., 2015)
5 (Minnesota Pollution Control Agency, 2021)
6 (Permit Modeling Unit et al., 2019)

Fuente: Elaboración propia

3.1.1.2 NSR Workshop Manual

De forma paralela, en Estados Unidos, la USEPA definió el concepto de área de incumplimiento, correspondientes a aquellas áreas que no cumplen los estándares primarios y secundarios de calidad del aire —o que contribuyen a empeorar la calidad ambiental de un área cercana que no cumple— (USEPA, n.d.-h). En dichas áreas aplica el programa conocido como **Revisión de Fuentes Nuevas para áreas de incumplimiento**, cuyas siglas en inglés corresponden a **NSR** (*New Source Review*), mencionado en la sección 3.1.1.1. Este aplica para **fuentes estacionarias nuevas de gran magnitud o modificaciones importantes a fuentes preexistentes**, que se localizan en zonas donde no se cumplen los NAAQS.

En el *NSR Workshop Manual*, elaborado por la USEPA (1990), se establecen dos definiciones para una fuente estacionaria: la **definición dual** y la **definición de planta** (*plantwide* en inglés). La primera definición indica que una fuente estacionaria es cualquier edificio, instalación o estructura que emita o tenga el potencial de emitir cualquier contaminante atmosférico sujeto a la *Clean Air* Act (42 USC §7401), principal ley asociada a contaminantes de este tipo en Estados Unidos que regula los mismos contaminantes para los cuales se ha determinado un NAAQS. La segunda definición comprende las instalaciones dentro de una planta como un todo y establece que solo los cambios físicos o de operación que resulten en un aumento significativo de las emisiones netas en toda la planta se consideran una modificación importante de una fuente preexistente.

Así, una fuente estacionaria es una estructura o instalación completa o una instalación individual que forma parte de una planta (por ejemplo, una parte de un equipo). Esta doble definición permite que cada unidad de emisión se trate como una fuente estacionaria separada e independiente y como una componente de toda la fuente estacionaria a la vez. Para una mejor comprensión de la aplicación de esta doble definición, ver Anexo 2 en la Sección 9.2.

Para dar cumplimiento al NSR, se requiere de tres cosas principalmente: la instalación de una fuente cuya tasa de emisión sea la más baja alcanzable, compensación de emisiones y oportunidad de participación pública (USEPA, n.d.-f). A continuación, se profundiza en estos requerimientos, de acuerdo con lo establecido en el *NSR Workshop Manual* (1990).

En primer lugar, la **tasa de emisión más baja alcanzable**, o **LAER** por su sigla en inglés, es la limitación más estricta impuesta por algún plan federal, o la limitación más estricta lograda en la práctica por alguna fuente de la misma categoría. Puede suceder que el nivel impuesto por algún plan federal en realidad no sea factible de alcanzar y, por ende, dicho nivel debe ser observado y revisado constantemente.

En segundo lugar, para obtener la aprobación de un permiso de una nueva fuente de gran magnitud o una modificación importante, el titular deberá encargarse de reducir emisiones. Para dar validez a estas, la autoridad ambiental encargada de su revisión tomará en cuenta cuáles son

los contaminantes que requieren ser compensados, qué cantidad, la ubicación de la compensación en relación con la fuente emisora propuesta, las fuentes permitidas para compensar, la línea base y la aplicabilidad de las compensaciones propuestas.

La reducción de emisiones que se obtengan para compensar una nueva fuente debe cumplir dos importantes objetivos:

- Asegurar progreso hacia el cumplimiento del NAAQS, y
- Proveer un beneficio positivo neto en la calidad del aire afectada por la fuente propuesta.

Una compensación aceptable debe cumplir con ser acreditable, cuantificable, exigible a nivel federal y permanente. Además, la proporción entre las emisiones compensadas y las emisiones de la fuente propuesta debe ser mayor a uno, para asegurar el progreso hacia el cumplimiento del NAAQS.

Una de las salvedades que se hacen en el *NSR Workshop Manual* es que aquellas reducciones resultantes de otra acción regulatoria no pueden ser contadas como compensaciones. Por ejemplo, una reducción requerida por algún plan federal no cuenta como compensación dentro del contexto del NSR.

En relación con la aplicabilidad del NSR de incumplimiento para zonas saturadas en Chile, dado que debe ir acompañado de una definición de fuente de gran tamaño, se debería previamente evaluar qué significaría replicar la definición utilizada por la USEPA, es decir, qué significaría para Chile considerar que una fuente de gran tamaño emite 10 o más toneladas de algún contaminante al año o 25 toneladas anuales o más de una combinación de contaminantes. La pregunta clave es cómo se traduciría esta definición en términos de una norma de calidad para así compararla con las normas vigentes actualmente en Chile.

3.1.2 Reino Unido

En esta sección se presentan los documentos del Reino Unido en que fue posible identificar criterios de evaluación de la significancia del efecto de contaminantes atmosféricos en zonas saturadas para la evaluación ambiental de proyectos.

3.1.2.1 Guía para la Evaluación de Riesgo de Emisiones Atmosféricas para Permiso Ambiental

La Agencia Ambiental del Reino Unido (EA), en su misión gubernamental de crear mejores lugares para las personas y la vida salvaje, y contribuir al desarrollo sustentable, es responsable en Inglaterra de regular las industrias, el tratamiento del suelo contaminado, observar la calidad del agua y de los recursos, de las pesquerías, de la navegación por ríos, estuarios y puertos interiores, y por último de la conservación ecológica. En este sentido, una de sus responsabilidades específicas es la de autorizar Permisos Ambientales para el desarrollo de distintas actividades

económicas (EA, n.d.). Para Gales, Escocia e Irlanda del Norte, otras autoridades son las responsables de gestionar el medioambiente y los recursos naturales.

De acuerdo con una de las guías provistas para verificar la necesidad de Permisos Ambientales (2020a), estos deberán se tramitados por titulares de proyectos que tengan el potencial de **contaminar el aire**, el agua o el suelo, o de incrementar el riesgo de inundación o si impacta de manera negativa el drenaje del suelo en la zona donde se localiza. Dentro de las operaciones que potencialmente podrían causar dichos efectos se cuentan aquellas instalaciones o industrias que puedan producir potencialmente alguna sustancia peligrosa; por ejemplo, un relleno sanitario, una granja ganadera, una fábrica de alimentos, elementos químicos y otros. Los botadores de estériles, asociados a actividad minera, junto a plantas generadoras, también podrían necesitar este permiso previo al inicio de la operación de estos proyectos.

En la elaboración del Permiso se requiere, en algunos casos, de una **Evaluación de Riesgo**. Existe un número de Reglas Estándar para los distintos tipos de proyectos, que de cumplirse a cabalidad eximirán al titular de realizar la Evaluación de Riesgo; en caso contrario, el titular deberá realizar la Evaluación de Riesgo. En cuanto a las emisiones atmosféricas, esta Evaluación de Riesgo consiste en comparar los niveles de emisión de la fuente solicitante con los estándares ambientales vigentes en el Reino Unido (EA, 2021).

Otro de los recursos importantes que provee la autoridad del Reino Unido es la Guía para la Evaluación de Riesgo de Emisiones Atmosféricas para Permiso Ambiental (2021), la cual entrega los lineamientos principales para la elaboración de la Evaluación de Riesgo. De acuerdo con dicha Guía, uno de los primeros pasos es calcular las concentraciones de cada una de las sustancias que la fuente libera a la atmósfera o, en otras palabras, determinar la **contribución del proceso (CP)**. Luego, se debe identificar para qué sustancias la CP es insignificante y así poder obviarlas. Para que el CP de una sustancia sea considerado insignificante se debe cumplir que el CP a corto plazo sea menos del 10% del estándar ambiental en el mismo plazo, y que el CP a largo plazo sea menos del 1% del estándar ambiental a largo plazo.

En tercer lugar, para aquellas sustancias cuyo impacto se declaró significativo se debe calcular la **concentración ambiental predicha (CAP)**, la que corresponde a la suma de la CP más la concentración preexistente. Esta última se puede obtener a partir de un *background map*, disponible en la página web de la DEFRA, que entrega una concentración de distintos contaminantes con una definición de 1 km cuadrado por zona geográfica. Para cada sustancia, se debe comparar la CAP y la CP con los estándares ambientales vigentes (EA & DEFRA, 2021).

Se deberán tomar medidas adicionales en tres casos:

1. La CP pueda causar que una CAP exceda un estándar ambiental, a menos que la CP calculada sea mucho menor a la de otras fuentes emisoras.
2. La CAP ya está siendo excedida.
3. No se cumple con las exigencias tecnológicas.

La principal medida adicional a tomar es la realización de un **análisis costo beneficio (ACB)**. Los detalles requeridos en el ACB dependerán del tipo de proyecto que requiera aprobación. Por ejemplo, en el caso de que el proyecto se trate de instalaciones de combustión, el ACB debe ser llevado a cabo cuando se trate de una instalación nueva o de una modificación a alguna preexistente, incluso si no se sobrepasan límites ambientales. En este caso específico, existe una planilla a ser rellenada por el titular del proyecto, la que incluye aspectos como soluciones técnicas incorporadas, qué tipo de combustible se usa, a cuántas personas se provee, parámetros financieros y flujos de caja (EA, 2015). En el caso de una instalación industrial, en el ACB se deben reconocer todas aquellas actividades que incrementen o reduzcan las emisiones. Por ejemplo, si se trata de contaminantes atmosféricos, se deben monetizar los costos y beneficios de aquellas actividades que incrementan las emisiones y aquellas que las reducen, para luego poder calcular el costo o beneficio neto asociado (EA, 2020b). Hasta la fecha no se ha logrado una regla general que indique qué debe considerar un ACB cuando se postula a la obtención de un Permiso en una zona donde la norma ambiental está siendo superada.

Sin embargo, en el Reglamento de Permisos Ambientales (2016), válido para Inglaterra y Gales, se hace mención al ACB como parte de los requerimientos de aceptación para aquellos proyectos de energía para calefacción y refrigeración, y aclara que se entenderá como ACB la definición presente en la Parte 2 del Anexo IX de la Directiva de Eficiencia Energética de la Unión Europea (2012), en donde se menciona que en el caso de que se proyecte una instalación de generación eléctrica o una instalación sin recuperación de calor, se deberá realizar una comparación entre estas y una instalación equivalente que genere la misma cantidad de electricidad o de calor, pero que recupere calor residual y que suministre calor mediante la cogeneración de alta eficiencia y las redes urbanas de calefacción o refrigeración.

Cabe añadir que en el Reglamento de Permisos Ambientales se establece que cuando en un ACB los beneficios superan a los costos, el regulador debe asegurar que el Permiso Ambiental otorgado incluya las condiciones de operación que muestran ser benéficas según el análisis llevado a cabo.

Con respecto a la aplicación de esta metodología en Chile, como parte de la aprobación de un EIA o DIA en una zona saturada, sería útil conocer la relación entre los costos y beneficios de una fuente emisora a través de un ACB exhaustivo, que considere la monetización de todos los impactos en las áreas de influencia, de forma de poder aprobar solo aquellos proyectos que representen un beneficio neto. Para tales efectos, sería necesario incorporar un reglamento que establezca cuáles son los requerimientos en el desarrollo de un ACB para distintos tipos de fuentes y así homogeneizar las exigencias para cada una. Sin embargo, la implementación de este requerimiento podría ralentizar el proceso de elaboración de una EIA o una DIA e incluso encarecerlo.

3.1.2.2 Control de planificación y desarrollo del uso del suelo: planificación para la calidad del aire

En el Reino Unido, son las autoridades locales a nivel de distrito o condado las responsables de las decisiones acerca de temas de desarrollo. Cuando llegan a una decisión sobre algún proyecto de desarrollo propuesto se debe lograr un equilibrio entre consideraciones económica, sociales y ambientales. Por esto, es que es necesario que tengan consideraciones adecuadas en cuestiones como la calidad del aire (EPUK & IAQM, 2017) y se debe prestar especial atención a:

- Cumplimiento de los objetivos nacionales de calidad del aire y de los valores límite de la Unión Europea.
- Si el desarrollo afectará materialmente cualquier plan de acción o estrategia de calidad del aire.
- La degradación (o mejora) general de la calidad del aire local.
- Si el desarrollo introducirá una nueva exposición pública en un área de mala calidad del aire existente.

El Marco de Política de Planificación Nacional (NPPF) y la Política de Planificación de Gales (PPW) establecen la política de planificación para Inglaterra y Gales, respectivamente. En estas se enfatiza la importancia que tiene la planificación del desarrollo local y el deber de desempeñar un rol ambiental para minimizar la contaminación. Ambos reconocen la importancia de cuidar la calidad del aire y buscan que sean tomados en cuenta los efectos de la contaminación en la salud y en el área, así como también el desarrollo económico. Por otro lado, tanto el NPPF como el PPW establece que cualquier nuevo desarrollo en las áreas de gestión de la calidad del aire debe ser coherente con el plan de acción local de la calidad del aire, el que debe mantener y contribuir con el cumplimiento de los valores límite de la UE o los objetivos nacionales para los respectivos contaminantes (EPUK & IAQM, 2017).

La Guía de prácticas de planificación (PPG) es el respaldo del NPPF, mientras que las Notas de asesoramiento técnico (TAN) y una Guía de planificación complementaria son los respaldos del PPW. En estos se establecen principios rectores sobre cómo la planificación puede tener en cuenta los impactos de los nuevos desarrollos en la calidad del aire (EPUK & IAQM, 2017).

A continuación, en la Tabla 3-5 se muestran los diversos documentos que rigen la regulación de la calidad del aire y planificación en Inglaterra.

Tabla 3-5 Contexto de la planificación y la calidad del aire en Inglaterra

Nivel	Documentación relevante
Nacional	Marco de políticas de planificación nacional Orientación para la práctica de planificación Estrategia de calidad del aire 2007
Regional	Estrategias regionales de calidad del aire
Local	Marco de desarrollo local (LDF) Documentos de planificación complementarios (SPD) Planes de acción sobre la calidad del aire Orientación local sobre la calidad del aire Planes de vecindario

Fuente: (EPUK & IAQM, 2017) Tabla 4.1

En el nivel local se encuentran los documentos de planificación complementarios (SPD), estos representan una guía adoptada formalmente por las autoridades locales en Inglaterra y generalmente establecen cuándo se requiere una evaluación de la calidad del aire y qué debe incluir. Algunos también incluyen criterios para evaluar la importancia del impacto de un desarrollo propuesto (EPUK & IAQM, 2017).

En el Reino Unido se publicó en 2017 la guía "*Land-Use Planning & Development Control: Planning For Air Quality*", desarrollada por dos organizaciones relacionadas a la calidad del aire. Una de estas es la Protección del Medio Ambiente Reino Unido (EPUK), una organización benéfica nacional que ofrece análisis de políticas de expertos y asesoramiento sobre la calidad del aire, la calidad de la tierra, los residuos y el ruido, y sus efectos en las personas y las comunidades en términos de una amplia cantidad de cuestiones que incluyen la salud pública, la planificación y el transporte, energía y clima. La otra es el Instituto de Gestión de la Calidad del Aire (IAQM), la cual es un organismo para los profesionales de la calidad del aire, siendo su objetivo ser "la voz de la calidad del aire en el Reino Unido al producir una guía útil y oportuna sobre asuntos que afectan a los profesionales de la calidad del aire y al responder a las consultas gubernamentales" (IAQM, n.d.).

Esta guía fue elaborada para garantizar que la calidad del aire se considere adecuadamente en los procesos de control del desarrollo y planificación del uso de la tierra. Establece por qué la calidad del aire es una consideración importante en muchos aspectos de la planificación espacial. Enfatiza cómo una buena planificación espacial puede reducir la exposición a la contaminación del aire, además de brindar otros beneficios de bienestar a la comunidad en general. También enfatiza la importancia de aplicar un buen diseño y medidas de "mejores prácticas" a todos los desarrollos, para reducir tanto las emisiones contaminantes como la exposición humana. También sugiere un marco para la evaluación de los impactos de los desarrollos en la calidad del aire local (EPUK & IAQM, 2017).

De forma paralela, la EA desarrolló una guía para la evaluación de emisiones al aire, la cual tiene como objetivo ayudar en la determinación de las Mejores Técnicas Disponibles para una instalación regulada bajo la Directiva de Emisiones Industriales (IED). Lo anterior, se diferencia

del documento desarrollado por EPUK & IAQM (2017), el cual está enfocado en proporcionar un medio que permita concluir sobre si el desarrollo espacial propuesto tiene un impacto significativo probable en la calidad del aire local, teniendo en cuenta la gravedad general de los impactos y otros factores, según correspondan. Así, ambos documentos se complementan en sus respectivas funciones y objetivos.

La guía se puede utilizar para todos los contaminantes atmosféricos que tengan un AQAL, esto es un nivel de evaluación de la calidad del aire —puede ser un límite de la UE, un "Nivel de evaluación ambiental (EAL)" de la Agencia de Medio Ambiente o un objetivo de calidad del aire—. Aplica para desarrollos residenciales y de uso mixto, especialmente aquellos dentro de áreas urbanas donde la calidad del aire es peor. También se puede aplicar para cualquier otra forma de desarrollo donde una propuesta podría afectar la calidad del aire local y para la cual no existe ninguna otra guía. No está destinada a aplicarse a la evaluación de los impactos de la calidad del aire en los sitios designados para la conservación de la naturaleza (EPUK & IAQM, 2017).

En la recomendación se definen descriptores de impacto para receptores individuales, relacionando la concentración promedio a largo plazo en el receptor en el año de evaluación con el porcentaje de cambio en la concentración en relación con el nivel de evaluación de la calidad del aire (AQAL). Estos descriptores presentados en la Tabla 3-6[52] se clasifican como despreciable, leve, moderado o sustancial y no son, por sí mismos, una guía clara e inequívoca para llegar a una conclusión sobre la significancia del impacto (EPUK & IAQM, 2017).

Tabla 3-6 Descriptores de impacto para receptores individuales

Concentración promedio a largo plazo en el receptor en el año de evaluación	% De cambio en la concentración en relación con el nivel de evaluación de la calidad del aire (AQAL)			
	1	2-5	6-10	>10
75% o menos del AQAL	Despreciable	Despreciable	Leve	Moderado
76-94% del AQAL	Despreciable	Leve	Moderado	Moderado
95-102% del AQAL	Leve	Moderado	Moderado	Sustancial
103-109% del AQAL	Moderado	Moderado	Sustancial	Sustancial
110% o más del AQAL	Moderado	Sustancial	Sustancial	Sustancial

Fuente: (EPUK & IAQM, 2017) Tabla 6.3

Este método de evaluación utiliza la descripción de impactos en los receptores individuales, estos se elegirán para representar grupos de propiedades residenciales, por ejemplo, y el evaluador deberá considerar el número aproximado de personas expuestas a impactos en las distintas categorías de gravedad, para llegar a una conclusión sobre la importancia del efecto. Una propiedad individual expuesta a un impacto adverso moderado podría no considerarse un efecto significativo, pero muchos cientos de propiedades expuestas a un impacto adverso leve podrían serlo. Dichos juicios deberán hacerse por expertos teniendo en cuenta múltiples factores (EPUK & IAQM, 2017).

[52] La versión original de esta tabla se encuentra en el Anexo 1, en la Sección 9.1.

Es importante mencionar que para el uso de la Tabla 3-6 se debe redondear el cambio en la concentración porcentual de contaminante a números enteros, lo que luego aclara en qué celda se encuentra el impacto y los cambios del 0%, es decir, menos del 0,5%, se describirán como insignificantes. Además, solo está diseñada para usarse con concentraciones medias anuales (EPUK & IAQM, 2017).

Las categorías de concentración total reflejan el grado de daño potencial por referencia al valor AQAL. Con una exposición inferior al 75% de este valor, es decir, muy por debajo, es probable que el grado de daño sea pequeño. A medida que la exposición se acerca y supera el AQAL, aumenta el grado de daño. Este cambio naturalmente se vuelve más importante cuando el resultado es una exposición que es aproximadamente igual o mayor que el AQAL (EPUK & IAQM, 2017).

Existe una categoría que tiene un rango alrededor del AQAL, en lugar de ser exactamente igual a él, porque debido a la incertidumbre inherente, no es prudente atribuir demasiada precisión a cambios incrementales o concentraciones de fondo, sin embargo, si se encuentra en este rango se considera como superación de la norma o valor objetivo (EPUK & IAQM, 2017).

Por ejemplo, si se considera una concentración promedio a largo plazo a la cual está expuesto el receptor individual de 106% del AQAL y el porcentaje de cambio en la concentración en relación con el nivel de evaluación de la calidad del aire (AQAL) es de 3%, según la Tabla 3-6 el impacto sobre ese receptor se considera Moderado. Este descriptor de impacto no es, por sí mismo, una guía clara e inequívoca para llegar a una conclusión sobre la significancia del impacto, sino que los descriptores están pensados para su aplicación en una serie de receptores individuales. Si bien puede ser que haya impactos "leves", "moderados" o "sustanciales" en uno o más receptores, es posible que el efecto general no se considere necesariamente significativo en algunas circunstancias, el resultado final de la significancia del impacto debe ser definido por un experto considerando diversos criterios y factores que influyen en el proyecto evaluado (EPUK & IAQM, 2017).

El criterio presentado podría ser aplicable en Chile en cuanto a un cambio porcentual de concentración sobre el nivel de la norma, además es interesante que integre límites según la vulnerabilidad de los receptores, donde se puede considerar en la evaluación los efectos en la salud humana. Sin embargo, se tiene que evaluar cuidadosamente cómo se aplicaría en zonas saturadas y sus implicancias.

3.1.3 Unión Europea

A continuación, se presenta el documento de la Unión Europea en que fue posible identificar criterios de evaluación de la significancia del efecto de contaminantes atmosféricos en zonas saturadas para la evaluación ambiental de proyectos.

3.1.3.1 Guía para la Elaboración de Evaluaciones de Impacto Ambiental

La Evaluación Ambiental de proyectos (*Environmental Impact Assesment* (EIA) *of projects*) (Adrien Lantieri, Zuzana Lukacova, Jennifer McGuinn, 2017) es una herramienta de política ambiental utilizada por la Unión Europea (UE) que está establecida en la Directiva 2011/92/EU y corregida en la Directiva 2014/52/EU (DIRECTIVE 2011/92/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 13 December 2011 on the Assessment of the Effects of Certain Public and Private Projects on the Environment, 2011). En 2001, la comisión de la UE publicó tres documentos para guiar el desarrollo de tres etapas del proceso de un EIA (Adrien Lantieri, Zuzana Lukacova, Jennifer McGuinn, 2017): (1) Detección, (2) Determinación del Alcance del Estudio y (3) Preparación del Informe de EIA. Luego en 2017, la UE publicó la guía: "*Environmental Impact Assessment of Projects: Guidance on the preparation of the Environmental Impact Assessment Report*". Esta es un guía para la realización de Evaluaciones de Impacto Ambiental que consiste en una actualización y revisión de los tres documentos de guía originales publicados por esta comisión en 2001. De acuerdo con la Directiva 2011/92/EU (EU, 2011), los proyectos que deben realizar un EIA son aquellos que pueden tener impactos significativos sobre el medio ambiente[53].

En la guía para la elaboración de Evaluaciones de Impacto Ambiental (Adrien Lantieri, Zuzana Lukacova, Jennifer McGuinn, 2017) se señalan las normativas que existen respecto a la calidad del aire en la UE, estas son las siguientes:

1. Directiva 2008/50/EC, que establece el marco y los objetivos de calidad ambiental y aire limpio en Europa, y
2. Directiva 2004/107/EC, que establece los límites de concentraciones de arsénico, cadmio, níquel y benzo(a)pireno en el aire.

Adicionalmente, en la sección de evaluación de la significancia de los impactos se menciona que en el marco del programa *LIFE + Project* se desarrolló el proyecto IMPERIA que propone el uso del método ARVi (IMPERIA Project, 2015). Este método utiliza una herramienta programada en Excel, que permite evaluar de forma automatizada la significancia de los impactos y comparar alternativas. El método ARVi establece que la significancia del impacto está dada por dos criterios principales: la **sensibilidad del receptor** y la **magnitud del cambio**. Adicionalmente, establece que, al momento de evaluar la significancia del impacto, se debe tomar en cuenta: las fases del proyecto, las acciones separadas que comprenden las alternativas, las zonas de impacto cercanas y lejanas, y la duración del impacto. A continuación, se detallan las dos variables principales en el método ARVi y los factores a ser considerados para su evaluación.

La **evaluación de la sensibilidad del receptor** corresponde a una descripción del receptor[54]. En esta evaluación se consideran tres sub-criterios (1) regulación y guías existentes, (2) valor social, y (3) vulnerabilidad a los cambios. El método propuesto para la evaluación de estos factores se detalla a continuación:

[53] En el Anexo 1 de la Directiva 2011/92/EU se mencionan los tipos de proyectos que por obligación deben realizar un EIA.
[54] Objeto que es afectado por los impactos.

1) **Regulación y guías existentes:** Análisis respecto a si hay alguna regulación o ley sobre el receptor en el área existente.

Tabla 3-7 Clasificación de la sensibilidad del receptor según alguna regulación o ley

Clasificación del impacto	Consideraciones de cada clasificación
Muy alto ****	El área de impacto incluye un receptor que está protegido por ley nacional o una directiva de la UE o contratos internacionales que podrían prevenir el desarrollo propuesto.
Alto ***	El área de impacto incluye un receptor que está protegido por una ley nacional o una directiva de la UE o un contrato internacional que puede tener impacto directo en la viabilidad del desarrollo propuesto.
Moderado **	La regulación establece recomendaciones o valores de referencia para un receptor en el área de impacto, o el proyecto puede tener un impacto en un área en conservación por un programa nacional e internacional.
Bajo *	Pocas o sin recomendaciones que se agregue al valor de conservación del área de impacto y sin regulaciones que restrinjan el uso del área.

Fuente: (IMPERIA Project, 2015)

2) **Valor social**: Valorización del carácter económico, social y medio ambiental del objeto para el receptor.

Tabla 3-8 Clasificación de la sensibilidad del receptor según el valor social

Clasificación del impacto	Consideraciones de cada clasificación
Muy alto ****	El receptor es altamente único, muy valioso para la sociedad y posiblemente irremplazable. El receptor puede ser considerado internacionalmente significante y valioso. El número de personas afectadas es muy alto.
Alto ***	El receptor es único y valioso para la sociedad. El receptor puede ser considerado valioso y significativo a nivel nacional. El número de personas afectadas es alto.
Moderado **	El receptor es valioso y localmente significativo, pero no muy único. El número de personas afectadas es moderado.
Bajo *	El receptor tiene un bajo valor y no es único. El número de personas afectadas es bajo.

Fuente: (IMPERIA Project, 2015)

3) **Vulnerabilidad de los cambios**: se evalúa qué tan propenso es el receptor a ser influenciado o dañado por la contaminación.

Tabla 3-9 Clasificación de la sensibilidad del receptor según la vulnerabilidad de los cambios

Clasificación del impacto	Consideraciones de cada clasificación
Muy alto ****	Incluso un cambio externo muy pequeño podría cambiar substancialmente el estatus del receptor. En el área hay muchos objetivos/receptores muy sensibles.
Alto ***	Incluso un cambio externo pequeño podría cambiar substancialmente el estatus del receptor. En el área hay varios objetivos/receptores muy sensibles.
Moderado **	Al menos se necesitan moderados cambios para cambiar substancialmente el estatus del receptor. En el área hay algunos objetivos/receptores muy sensibles.
Bajo *	Incluso un cambio externo grande podría no tener un impacto substancial en el estatus del receptor. En el área hay unos pocos o ningún objetivo(s)/receptor(es) sensible(s).

Fuente: (IMPERIA Project, 2015)

La sensibilidad final del receptor sería evaluada por un experto en la materia según la base de su evaluación de los sub-criterios mencionados anteriormente. Para evaluar la sensibilidad del receptor, una regla general es elegir el máximo entre las regulaciones existentes y valor social, y ajustar el valor dependiendo de la vulnerabilidad. La Tabla 3-10 se utiliza para obtener la sensibilidad final del receptor, como resultado del análisis de los tres sub-criterios previamente descritos para este criterio.

Tabla 3-10 Clasificación final de la sensibilidad del receptor

Nivel de significancia	Descripción del nivel de significancia para el criterio de sensibilidad del receptor
Muy alto ****	La legislación conserva de forma estricta al receptor, o es irremplazable para la sociedad, o puede ser extremadamente perjudicado por el desarrollo del proyecto. Incluso una pequeña influencia por el proyecto propuesto probablemente haría inviable el proyecto.
Alto ***	La legislación conserva de forma estricta al receptor, o es muy valorado por la sociedad, o puede ser muy perjudicado por el desarrollo del proyecto.
Moderado **	El receptor tiene un valor moderado para la sociedad, su vulnerabilidad al cambio es moderado, la regulación puede tener valores de referencia o recomendaciones, y puede estar en un programa de conservación. Incluso un receptor que tiene un valor mayor para la sociedad puede tener una sensibilidad moderada, si es que tiene una vulnerabilidad baja, y viceversa.
Bajo *	EL receptor tiene un menor valor social, baja vulnerabilidad al cambio y no existen regulaciones o guías al respecto. Incluso un receptor que tiene un mayor o moderado valor social puede tener una baja sensibilidad si es que no es propenso a ser influenciado por el desarrollo del proyecto.

Fuente: (IMPERIA Project, 2015)

La **evaluación de la magnitud del impacto** describe las características de los cambios planeados por el proyecto. La magnitud se define como una combinación entre tres sub-criterios: (1) intensidad y dirección, (2) extensión espacial, (3) duración. No se toma en cuenta la sensibilidad del receptor al evaluar los cambios producidos por los proyectos, es decir, la evaluación de estos dos criterios se realiza de manera independiente.

1) **Intensidad y dirección:** la intensidad describe la dimensión física del impacto y se puede medir con unidades físicas y comparar con valores estándar, por ejemplo, con las normas de calidad del aire en µg/m^3. La dirección del impacto tiene relación con que un impacto puede ser positivo o negativo, es decir, beneficioso o perjudicial para el medio ambiente.

Tabla 3-11 Clasificación de la magnitud del impacto según la intensidad y la dirección del efecto

Clasificación del impacto	Consideraciones de cada clasificación
Muy alto **++++**	La propuesta tiene un efecto extremadamente beneficioso en la naturaleza o carga ambiental. Un cambio social beneficia sustancialmente la vida cotidiana de las personas.
Alto **+++**	La propuesta tiene un efecto muy beneficioso en la naturaleza o carga ambiental. Un cambio social que claramente beneficia la vida cotidiana de las personas.
Moderado **++**	La propuesta tiene un efecto positivo claramente observable en la naturaleza o carga ambiental. Un cambio social tiene un efecto que beneficia observablemente la vida cotidiana de las personas.
Bajo **+**	El efecto es positivo y observable, pero los cambios en las condiciones ambientales o personas son pequeños.
Sin impacto	El efecto es tan pequeño que no tiene ninguna implicancia práctica. Cualquier beneficio o daño es despreciable.
Bajo **-**	Un efecto es observable y negativo, pero los cambios en las condiciones ambientales o personas son pequeños.
Moderado **--**	La propuesta tiene un efecto negativo claramente observable en la naturaleza o carga ambiental. Un cambio social tiene un efecto observable en la vida cotidiana de las personas y puede impactar sus rutinas diarias.
Alto **---**	La propuesta tiene un gran efecto perjudicial en la naturaleza y carga ambiental. Un cambio social claramente obstaculiza la vida cotidiana de las personas.
Muy alto **----**	La propuesta tiene un efecto extremadamente perjudicial en la naturaleza y carga ambiental. Un cambio social obstaculiza la vida cotidiana de las personas de manera substancial.

Fuente: (IMPERIA Project, 2015)

2) **Extensión espacial**: es el área geográfica afectada o el rango donde el efecto es observable.

Tabla 3-12 Clasificación de la magnitud del impacto según la extensión espacial del efecto

Clasificación del impacto	Consideraciones de cada clasificación
Muy alto ****	El impacto se extiende por varias regiones y puede cruzar fronteras nacionales. El rango típico es > 100 km.
Alto ***	El impacto se extiende por una región. El rango típico es 10 – 100 km.
Moderado **	El impacto se extiende por una municipalidad. El rango típico es 1 – 10 km.
Bajo *	El impacto se extiende solo a la vecindad cercana a la fuente. El rango típico es < 1 km.

Fuente: (IMPERIA Project, 2015)

3) **Duración**: Es la cantidad de tiempo en que el efecto es observable. También considera el momento y/o la época del año del efecto y su periodicidad.

Tabla 3-13 Clasificación de la magnitud del impacto según la duración del efecto

Clasificación del impacto	Consideraciones de cada clasificación
Muy alto ****	El impacto es permanente. El área de impacto no se recuperaría incluso si después el proyecto es clausurado.
Alto ***	El impacto tiene una duración de varios años. El área de impacto se recuperaría después de que el proyecto sea clausurado.
Moderado **	El impacto dura desde uno a un número de años. Un impacto de largo plazo puede caer en esta categoría si no es constante y solo ocurre en los periodos que causan la menor perturbación posible.
Bajo *	Un impacto cuya duración es a lo más un año, por ejemplo, durante la construcción y no la operación del proyecto. Un impacto de mediano plazo puede caer en esta categoría si no es constante y solo ocurre en periodos que causa la menor perturbación posible.

Fuente: (IMPERIA Project, 2015)

Para obtener la magnitud total del cambio debido a los efectos del proyecto, se siguen los siguientes criterios:

- Si todos los sub-criterios—mencionados anteriormente— tienen el mismo valor, entonces el valor total es ese valor.
- Si no tienen el mismo valor, entonces la intensidad se debiera considerar como punto de partida y luego se debiera ajustar según los sub-criterios de extensión espacial y duración.

Utilizando estos criterios, la magnitud total del cambio se clasifica como se muestra en la Tabla 3-14, como resultado del análisis de los tres sub-criterios previamente descritos para este criterio.

Tabla 3-14 Clasificación final de la magnitud total del cambio

Nivel de significancia	Descripción del nivel de significancia para el criterio de la magnitud total del cambio
Muy alto ++++	La propuesta tiene efectos beneficiosos de una muy alta intensidad y extensión y duración de los efectos a lo menos alta.
Alto +++	La propuesta tiene efectos beneficiosos de una alta intensidad y extensión y duración de los efectos a lo menos alta.
Moderado ++	La propuesta tiene efectos positivos claramente observables en la naturaleza y vida cotidiana de las personas y la extensión y duración de los efectos es moderada.
Bajo +	Un efecto positivo y observable, pero el cambio en las condiciones ambientales y/o personas es pequeño.
Sin impacto	Ningún cambio es apreciable. Cualquier daño o beneficio es despreciable.
Bajo -	Un efecto negativo y observable, pero el cambio en las condiciones ambientales y/o personas es pequeño.
Moderado --	La propuesta tiene efectos negativos claramente observables en la naturaleza y vida cotidiana de las personas y la extensión y duración de los efectos es moderada.
Alto ---	La propuesta tiene efectos dañinos de una alta intensidad y extensión y duración de los efectos a lo menos alta.
Muy alto ----	La propuesta tiene efectos dañinos de una muy alta intensidad y extensión y duración de los efectos a lo menos alta.

Fuente: (IMPERIA Project, 2015)

Para evaluar finalmente la significancia del impacto se deben cruzar los resultados obtenidos de sensibilidad del receptor y de magnitud del cambio según la Tabla 3-15 a continuación. Por ejemplo, si un efecto según el criterio de sensibilidad del receptor es “Alta” y la magnitud del cambio es “Muy alto” y negativo, entonces la significancia del impacto es “Muy Alta” (color rojo oscuro).

Tabla 3-15 Clasificación final de la significancia del impacto

Significancia del impacto		Magnitud del cambio							
		Muy alto	**Alto**	**Moderado**	**Bajo**	**Sin efecto**	**Bajo**	**Alto**	**Muy alto**
Sensibilidad del receptor	**Baja**	Alto	Moderado	Bajo	Bajo	Sin efecto	Bajo	Bajo	Alto
	Moderada	Alto	Alto	Moderado	Bajo	Sin efecto	Bajo	Moderado	Alto
	Alta	Muy alto	Alto	Moderado	Moderado	Sin efecto	Moderado	Moderado	Muy alto
	Muy Alta	Muy alto	Muy alto	Alto	Alto	Sin efecto	Alto	Alto	Muy alto

Nota: Los cuadros verdes son efectos positivos y los rojos negativos.

Fuente: (IMPERIA Project, 2015)

Algunas limitaciones de este método son que requiere en análisis de expertos, ya que algunos criterios son de carácter cualitativo, y que solo se ha usado en el análisis de impactos sobre la calidad del agua, paisaje y ruido. Sin embargo, esto no impide que sean utilizados para evaluar la significancia de los impactos en calidad del aire, debido a que son criterios y sub-criterios generales.

3.1.4 Países Bajos – Decreto "Not make a significant contribution"

El decreto "*Not make a significant contribution*" (NIBM, por sus siglas en holandés) se promulgó en el año 2007 en Países Bajos y establece que, si un proyecto incrementa en un máximo de 3% el valor anual de la normativa de calidad del aire de MP_{10} y NO_2, este incremento no se considerará significativo (ver Tabla 3-16). Solo se consideran estos dos contaminantes debido a que son los únicos con riesgo a que superen el límite de la norma (Minister van Infrastructuur en Waterstaat, n.d.)[55].

Tabla 3-16 Comparación entre porcentaje significativo establecido y normas de calidad del aire para MP_{10} y NO_2 en los Países Bajos

Contaminante	Tiempo promedio	Norma [µg/m³]	Porcentaje significativo	Concentración que representa [µg/m³]
MP_{10}	24 horas	50	3%	1,5
	1 año	40		1,2
NO_2	1 hora	200		6,0
	1 año	40		1,2

Fuente: Elaboración propia a partir de norma (Minister van Infrastructuur en Waterstaat, n.d.)

Los tipos de proyectos que están sujetos a esta normativa son: locales comerciales, infraestructura, edificios de oficina o residenciales. En 2012 se actualizó el decreto y se agregó que se pueden establecer áreas de excepción, donde temporalmente este reglamento no se aplica. Estas son áreas donde los niveles de concentración del contaminantes son continuamente altos y se sobrepasan los valores límites de calidad del aire, especialmente de MP_{10} (Besluit Niet in Betekenende Mate Bijdragen (Luchtkwaliteitseisen), 2012). Se establece esta medida, porque se evidenció que en zonas donde se supera la norma de MP_{10}, el NIBM contribuye a aumentar la concentración de este contaminante y los esfuerzos/planes que se realizan para disminuir la concentración de MP_{10} no eran efectivos, especialmente porque se agregaban números ilimitados de proyectos que cumplían el NIBM.

En la revisión no fue posible identificar la justificación de definir que un valor bajo el 3% de la norma de calidad del aire se considere como "no significativo". Sin embargo, en la revisión se identificó que el valor fijado de 3%, bajo el cual un impacto no se considera significativo, corresponde a una decisión técnica de la autoridad a cargo.

[55] Se debe tener en consideración que el valor de calidad del aire actual de MP_{10} y NO_2 es 40 µg/m³.

3.1.5 Nueva Zelanda – Reglamento de Gestión de Recursos (Estándares Ambientales Nacionales de Calidad del Aire)

El Reglamento de Gestión de Recursos (Estándares Ambientales Nacionales de Calidad del Aire) (2004) de Nueva Zelanda establece las definiciones, prohibiciones, estándares de calidad ambiental y regulaciones necesarias para el cuidado de la calidad del aire en el país. Dentro de las regulaciones establecidas se plantea la obligación de obtener un consentimiento de recursos para la descarga de contaminantes atmosféricos provenientes de cualquier actividad industrial o comercial. Los contaminantes regulados por dicho Reglamento son el MP_{10}, CO, O_3, NO_X y COV.

Dentro de las consideraciones del Reglamento se define el concepto de excedencia permisible. Este se refiere al número de veces que un estándar puede ser superado, según se estipule en la norma. Por ejemplo, el estándar de MP puede ser superado solo una vez en el plazo de un año, mientras que el estándar de NO_2 puede ser superado hasta nueve veces en el mismo plazo.

Asimismo, se establecen escenarios para los cuales la autoridad competente deberá declinar un consentimiento de recursos. En el caso del MP_{10}, se declinará un consentimiento si la descarga propuesta es probable de causar, en cualquier plazo, el incremento de la concentración de MP_{10} —calculada como la media en 24 horas— en más de 2,5 µg/m^3, en cualquier lugar de la zona contaminada[56] que no sea el sitio en donde el consentimiento sería aprobado. Dicha concentración equivale al 5% de la norma de calidad del aire para el MP_{10} (ver Tabla 3-17), y de acuerdo con el Ministerio del Medio Ambiente de Nueva Zelanda (2020), un proyecto que supere dicho incremento podrá ser aprobado solo en caso de que se comprometa a compensar sus emisiones dentro de la misma área.

Tabla 3-17 Comparación entre descarga significativa y norma de Nueva Zelanda para MP_{10}

Contaminante	Descarga significativa (µg/m^3)	Norma 24-horas (µg/m^3)	Porcentaje que representa
MP_{10}	2,5	50	5%

Fuente: Elaboración propia

Asimismo, en el caso del SO_2, la autoridad competente deberá declinar un consentimiento de recursos si la descarga propuesta es probable de causar un incremento por sobre el estándar permitido. Es decir, para este contaminante, no existe un margen de tolerancia por sobre la norma.

De forma similar, en el caso de CO, NO_X y COV la autoridad deberá declinar un consentimiento si la descarga propuesta de alguno de los tres contaminantes podría causar un incremento por sobre el estándar permitido de CO, NO_2 y O_3, respectivamente, o si es probable que dicha descarga sea la principal fuente del gas para el área en donde el consentimiento aplica.

[56] Una zona contaminada por MP_{10} es aquella para la cual existen datos de al menos 12 meses de antigüedad, en que la excedencia de MP_{10} fue superior a un día en el plazo de un año.

3.1.6 New South Wales, Australia – Procedimiento escalonado para estimar los impactos de las concentraciones de ozono a nivel del suelo de fuentes estacionarias

En Australia existen valores estándar de calidad del aire a nivel nacional para CO, Pb, NO_2, MP_{10}, $MP_{2,5}$, O_3 y SO_2. Mientras que cada estado regional está encargado del manejo y del monitoreo de la calidad del aire.

En este contexto, en 2011 la oficina de Medio Ambiente y Herencia (OEH, por sus siglas en inglés) del estado de North South Wales (NSW) le solicitó a la empresa ENVIRON Australia Pty Ltd un estudio para evaluar los impactos del **ozono** a nivel del suelo de las **fuentes estacionarias** en la Gran Región Metropolitana (ENVIRON Australia Pty Ltd, 2011). El principal objetivo de este estudio fue desarrollar un procedimiento escalonado para estimar los impactos en el ozono troposférico de fuentes estacionarias que emiten NO_2 y COV. Estas fuentes pueden ser nuevas o modificadas.

El procedimiento que se propone consta de dos niveles de evaluación[57]. Cada proyecto se debe someter a estos niveles según el **nivel de sus emisiones** y el **incremento de la concentración** de ozono que producen. Un proyecto puede no requerir ser evaluado si sus emisiones son menores al **umbral de emisiones** definido para la zona. En el caso de que sean mayores, se tiene que someter al **primer nivel de evaluación**, en el que se evalúa el incremento de la concentración de ozono en el aire con la herramienta de evaluación CAMx[58]. Si el valor es menor a 0,5 ppb (1 µg/m^3)[59], entonces el impacto se considera **no significativo**, pero de igual manera la fuente debe considerar implementar las RAT (*Reasonably Available Techniques*[60]). En el caso de que el incremento sea mayor a 0,5 ppb, pero menor al máximo incremento permitido, las fuentes no necesita una evaluación más profunda, sin embargo, deben implementar las BAT (*Best Available Techniques*[61]) o deben compensar las emisiones.

En el caso de que el incremento de ozono provocado por la fuente sea mayor a 1 ppb (2 µg/m^3), se debe realizar el **segundo nivel de evaluación**. Esta consiste en un modelamiento en el que se utilizan especificaciones más precisas de las características de la fuente, en comparación a la evaluación del primer nivel, en la que se hace una modelación de una fuente representativa.

En el proceso de evaluación se distingue entre **zonas no saturadas** y **saturadas**. Para ambas zonas se sigue el mismo procedimiento, pero cambian los valores de los umbrales de emisiones y los

[57] En el Anexo 3 sección 9.3 se muestra un diagrama con los niveles de este procedimiento.
[58] CAMx es un modelo de calidad del aire integrado con extensiones, desarrollado y distribuido por ENVIRON.
[59] Equivalencia estimada en condiciones estándar de temperatura y presión, iguales a 20°C y 1 atm.
[60] Se refiere a tecnologías de control de emisiones que estén razonablemente disponibles y seas económicas y tecnológicamente factibles.
[61] Se refiere al nivel más efectivo y avanzado en el desarrollo de una actividad y los métodos asociados a esta que proveen en principio una base para establecer el límite de emisión diseñado para prevenir y reducir las emisiones y el impacto en el medio ambiente. En palabras más simples, es la tecnología más efectiva y avanzada disponible que es viable tecnológica y económicamente.

incrementos máximos permitidos. Los umbrales de emisiones para la zona no saturada y saturada se muestran en el Anexo 4 en la sección 9.4. Adicionalmente, para el caso de una **zona no saturada** el incremento máximo permitido es un **25% del valor residual** entre el promedio de cinco años de las máximas concentraciones de 1 hora o 4 horas de ozono y el estándar de calidad del aire para este contaminante (1 hora: 100 ppb y 4 horas: 80 ppb). En el caso de **zonas saturadas**, el máximo incremento permitido es de **1 ppb**. Este valor se basa en dos criterios:

1. Los PSD para periodos de corto plazo (menores a 24 horas) de la USEPA son entre un 1% y 6% de los estándares de calidad del aire (NAAQS), por lo tanto, aplicado a los estándares de calidad del aire australianos serían un incremento de entre 1 ppb y 6 ppb.
2. El incremento tiene que ser medible utilizando instrumentos convencionales de medición de calidad del aire, y el límite de medición definido en este caso es 1 ppb.

Cabe destacar que el **criterio de 0,5 ppb** como incremento no significativo se utiliza en zonas no saturadas y saturadas. En el documento se declara que este incremento fue establecido teniendo en consideración las mediciones de ozono y los límites reportados, pero no se da información más precisa acerca del origen de este valor.

3.1.7 Resumen de los criterios identificados

En la Tabla 3-18 se sintetizan las principales características de los criterios de significancia identificados en la documentación internacional revisada, presentados previamente en las subsecciones de la Sección 3.1.

Tabla 3-18 Principales características de los criterios de significancia identificados en la documentación internacional revisada

País/ Organización	Documento	Recomendación/ Normativa	Tipo de criterio	Específico para aprobación de proyectos	Específico para zonas saturadas
EE.UU.	Guía sobre los niveles de impacto significativo del O_3, $MP_{2,5}$, NO_2 y SO_2 en el programa de permisos PSD	Recomendación	Valor de cambio de concentración definido por contaminante	Sí	No especifica
	NSR Workshop Manual	Recomendación	Cuantitativo (según magnitud de la emisión de la fuente)	Sí	No, pero contiene una sección específica.
Reino Unido	Control de planificación y desarrollo del uso del suelo: planificación para la calidad del aire	Recomendación	Porcentaje de la norma de calidad del aire	Sí	Tanto para zona sobre como bajo la norma
	Guía para la Evaluación de Riesgo de Emisiones Atmosféricas para Permiso Ambiental	Recomendación	Cuantitativo (Análisis Costo Beneficio)	Sí	No especifica
UE	Guía para la Elaboración de Evaluaciones de Impacto Ambiental	Recomendación	Cualitativo	Sí	No especifica
Países Bajos	Decreto “Not make a significant contribution”	Normativa	Porcentaje de la norma de calidad del aire	Sí	Tanto para zona sobre como bajo la norma. Sin embargo, se pueden establecer zonas de excepción si la situación de contaminación es crítica.
Nueva Zelanda	Reglamento de Gestión de Recursos (Estándares Ambientales Nacionales de Calidad del Aire)	Normativa	Valor de cambio de concentración definido por contaminante	Sí	Solo para MP_{10}, en que considera escenario de zona saturada.
Australia	Procedimiento escalonado para estimar los impactos de las concentraciones de O_3 a nivel del suelo de fuentes estacionarias	Recomendación	Cuantitativo (umbral de emisiones y valor de cambio de concentraciones)	Sí	Sí, propone un procedimiento para zonas saturadas y no saturadas.

Fuente: Elaboración propia

3.2 Reunión con el equipo técnico del SEA para definir qué criterios son replicables

En base a los resultados obtenidos en la Actividad 1.3 (Sección 3.1), se realizó una reunión con el equipo técnico del SEA para definir qué criterios son replicables en función a la construcción de los resultados esperados del objetivo específico 4 de la presente consultoría. Esta reunión se realizó el lunes 13 de diciembre de 2021 a las 15.00 horas, por medio de la plataforma Microsoft Teams. En la siguiente Tabla 3-19 se presentan los asistentes a la reunión.

Tabla 3-19 Asistentes reunión de definición de criterios recomendados a partir de normativa internacional

Nombre	Consultor / Contraparte SEA
Gino Olivares Castro	Contraparte SEA
Damary Fonseca Ayala	Contraparte SEA
Rodrigo Rosales Díaz	Contraparte SEA
Simón Sánchez Caro	Contraparte SEA
Luis Abdón Cifuentes	Consultor
Héctor Jorquera	Consultor
Gustavo Lagos	Consultor
Viviana Cerda Gho	Consultor
Sofía Contardo	Consultor
Daniela Madrazo	Consultor
María Jesús Melej	Consultor

Fuente: Elaboración propia

3.3 Criterios para definir significancia del impacto a partir de la revisión del estado del arte internacional

Si bien para la reunión de revisión de los criterios con el equipo técnico del SEA (ver Sección 3.2) se presentó una propuesta preliminar a partir de los criterios identificados en la documentación internacional, de acuerdo con la conversación sostenida en dicha reunión se acordó que debía trabajarse en mayor profundidad los criterios identificados antes de tener una propuesta definitiva.

Se destaca que los antecedentes identificados en el desarrollo de estas actividades, correspondiente a las actividades asociadas al cumplimiento del objetivo específico 1, y constituyen un insumo para la elaboración de la propuesta de criterios, en función a la construcción de los resultados esperados del objetivo específico 4 de la presente consultoría. En particular, se consideró abordar el análisis por medio del método de evaluación del riesgo incremental, para lo cual sería necesario contar también con los criterios obtenidos a partir del

desarrollo de las actividades asociadas al objetivo específico 2, cuyo desarrollo se presenta en la siguiente Sección.

4. Estudios nacionales e internacionales de afectación a la salud

Los resultados de la recopilación y revisión de literatura referente a estudios nacionales e internacionales en el ámbito de la toxicología, epidemiologia y ensayos clínicos respecto a los efectos sobre la salud de las personas de los contaminantes indicados en las normas primarias de calidad del aire vigentes a nivel nacional se detallan en la presente sección. Lo anterior corresponde al desarrollo de las actividades asociadas al cumplimiento del objetivo específico 2 de la presente consultoría.

Para la revisión de estos estudios se debe tener presente la diferencia entre los contaminantes cancerígenos y no cancerígenos. Esta diferencia se describe en la "Guía de evaluación de impacto ambiental: Riesgo para la salud de la población" (SEA, 2012a), en la cual se establece que los contaminantes cancerígenos son aquellos para los que no existe un umbral bajo el cual exista cero riesgo de cáncer o efectos adversos para la salud. En cambio, los contaminantes no cancerígenos son aquellos para los que existe un rango de magnitudes de exposición (desde cero hasta el umbral) que el organismo puede tolerar sin un impacto significativo en la salud.

4.1 Revisión y recopilación de literatura nacional e internacional referente a los efectos de los contaminantes sobre la salud de las personas

En esta sección se presentan los resultados de la recopilación y revisión de literatura referente a estudios nacionales e internacionales (al menos de los países indicados en el artículo 11° del RSEIA) en el ámbito de la toxicología, epidemiologia y ensayos clínicos respecto a los efectos sobre la salud de las personas de los contaminantes indicados en las normas primarias de calidad del aire vigentes a nivel nacional.

4.1.1 Marco teórico

En la presente sección se desarrolla a modo de síntesis el marco teórico tras las funciones Concentración-Respuesta[62], fundamentales para el entendimiento del método de riesgo incremental. En este caso, este marco teórico se describe como se presentó en la Guía metodológica para la elaboración de un Análisis General del Impacto Económico y Social (AGIES) para instrumentos de calidad del aire, publicada por el MMA (2015) —en adelante, Guía de AGIES de aire—, donde uno de los estudios utilizados para su elaboración fue desarrollado por GreenLab (2011). Esta guía define una metodología paso a paso para la elaboración de los AGIES de aire, en la que se presenta una sección específica para la estimación de los beneficios en salud

[62] Función que relaciona concentraciones atmosféricas de contaminantes y efectos sobre la salud. Es equivalente a las funciones de dosis-respuesta, pero en este caso la concentración o dosis a la que se expone la población es la misma para todas las personas.

asociados al instrumento de gestión de la calidad del aire en análisis. Si bien el enfoque de dicho apartado es el cálculo del cambio en la incidencia de efectos en salud, este incluye una descripción clara y sintética del trasfondo de las funciones concentración-respuesta, por lo que su contenido se resume a continuación.

El análisis de riesgo y su posterior valoración descansa en las funciones Concentración-Respuesta (C-R), que relacionan la incidencia de determinados efectos en salud (ΔE) con los niveles de concentracion ambiental de los contaminantes en estudio (ΔC), por medio de un factor denominado coeficiente de riesgo unitario (β). De este modo, el modelo de análisis de riesgo combina la información de los niveles de concentración con datos de incidencia de efectos y de población expuesta para estimar el número de casos anuales que son atribuibles a la contaminación atmosférica. Una forma general de la función de Concentración-Respuesta se muestra a continuación:

Ecuación 4-1 Función de Concentración-Respuesta general

$$\Delta E = \beta * \Delta C$$
$$E(C_0) - E(C) = \beta * (C_0 - C)$$

Fuente: Elaboración propia

Las funciones de Concentración-Respuesta se obtienen, en su mayoría, de estudios epidemiológicos de series de tiempo, estudios de cohorte, o estudios de sección transversal, los cuales son descritos a continuación (2011):

- Estudios de series de tiempo: observan los cambios temporales (generalmente diarios) en la incidencia de efectos en una población (por lo general, una ciudad o comunidad completa) y los relacionan estadísticamente con los cambios en los niveles de contaminantes. Asumiendo que la población se mantiene constante, esta actúa como su propio grupo control estadístico. Los mayores factores de confusión[63] son, en este caso, variables ambientales como temperatura y humedad que, al igual que la contaminación, varían en forma diaria.
- Estudios de sección transversal: estiman una relación funcional entre la incidencia de un cierto efecto a la salud en una ciudad o comunidad y diversas variables propias del área en cuestión, incluyendo la concentración de contaminantes. Esto se realiza analizando en forma conjunta diferentes ciudades o comunidades a la vez. Estos estudios pueden entregar una estimación de efectos de largo plazo, pero son mucho más sensibles el efecto de factores de confusión, por lo que su uso no es tan extendido.
- Estudios de cohorte: toman una muestra de individuos, generalmente seleccionada de manera aleatoria, y monitorean su estado de salud durante períodos largos de tiempo

[63] Los factores de confusión son variables que podrían explicar parcial o totalmente una correlación observada entre el efecto en salud estudiado y un factor de estudio, en este caso, la contaminación atmosférica, de modo que los resultados se ven afectados por una incertidumbre asociada a que no es posible diferenciar claramente si el factor en estudio es responsable del efecto observado o no.

(diez o más años), relacionándolo con características de los individuos y con variables ambientales. De esta manera, estiman el efecto de exposiciones a la contaminación de mediano y largo plazo sobre la salud de los individuos. Estos estudios requieren una gran cantidad de recursos, por lo que se han realizado muy pocos, especialmente en los Estados Unidos.

Al momento de evaluar los efectos de la contaminación atmosférica sobre la salud, se debe hacer una distinción en efectos **crónicos** y **agudos**[64], en cuanto a las funciones concentración-respuesta derivadas de los estudios. Por lo general los parámetros resultantes para efectos agudos tienen una unidad temporal diaria a diferencia de los crónicos cuya unidad temporal es el año.

Tanto para la estimación de los efectos de exposición crónica como aguda, se utiliza un valor denominado tasa de incidencia base. La tasa de incidencia consiste en un conteo de eventos, de mortalidad o morbilidad, divididos por la población con riesgo de sufrir este efecto. Esta tasa es representativa de la población bajo análisis. Se calcula de la siguiente forma:

Ecuación 4-2 Tasa de incidencia base

$$IR_{ij} = \frac{E_{ij}}{Pop_j}$$

Fuente: (GreenLabUC, 2011)

Donde:

E_{ij} es el número de efectos i en la población j.

Pop_j es el grupo de población j bajo análisis.

IR_{ij} es la tasa de incidencia del efecto i en la población j.

Para su estimación, el número de efectos puede ser obtenido a partir de los datos estadísticos que posee el Ministerio de Salud, mientras que la población puede ser obtenida a través de los datos que publica el Instituto Nacional de Estadística (INE)[65].

4.1.1.1 Efectos de exposición crónica

La mayoría de las funciones Concentración-Respuesta son del tipo **riesgo relativo**. Para estas funciones, que corresponden generalmente a relaciones de tipo log-lineal, el cambio en la incidencia de los efectos está dado por la siguiente ecuación:

[64] La Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR por sus siglas en inglés) también define efectos de exposición intermedios (duración entre 14 días y menos de un año) (Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2009). Sin embargo, estos estudios son menos comunes.

[65] Estas tasas fueron actualizadas para Chile en el estudio "Actualización de tasas de incidencia base de mortalidad y morbilidad para contaminación atmosférica y creación de un modelo automático para la actualización" (GreenLab, 2020), desarrollado por el equipo consultor.

Ecuación 4-3 Cambio de incidencia en efectos crónicos

$$\Delta E_{ij}^{k} = \left[\exp(\beta_{ij}^{k} \cdot \Delta C^{k}) - 1\right] Pop_{j}^{k} IR_{ij}$$

Fuente: (GreenLabUC, 2011)

Donde

ΔE_{ij}^{k} es el cambio en el número de efectos i debido al cambio de concentraciones del contaminante k en la población j.

β_{ij}^{k} es el coeficiente de riesgo unitario del efecto i en la subpoblación j producto del contaminante k. Este coeficiente se estima para corto, mediano o largo plazo.

ΔC^{k} es el cambio de concentración del contaminante k, en el periodo de interés.

Pop_{j}^{k} es el número de personas del grupo j que está expuesta al contaminante k.

IR_{ij} es la tasa incidencia base del efecto i en la población j.

La "población j" corresponde generalmente a una división de la población según grupo etario. Los más usados generalmente son infantes (0-1 años), niños[66] (0-17 años), adultos (18-64 años) y adultos mayores (mayores de 65 años), aunque en algunos estudios se usan grupos de edad definidos específicamente. En algunos casos no se distingue por grupo de edad, realizándose la estimación para la población completa.

El término $Pop_{j}^{k} IR_{ij}$ representa sencillamente el número de casos del efecto i observado en la situación actual, es decir, sin que se produzca el cambio en las concentraciones del contaminante. Este número de casos se expresa en función de la tasa de incidencia IR_{ij} y la población expuesta Pop_{j}^{k} debido a que generalmente el número de casos no está disponible directamente, pero se puede calcular fácilmente a partir de datos locales de población expuesta y de tasas de incidencia promedio del país o de la región bajo análisis.

4.1.1.1.1 Linealización de la Relación Concentración-Respuesta

Debido a que el riesgo unitario es generalmente pequeño (generalmente del orden de 10^{-3}), la Ecuación 4-3 se puede linealizar, de modo de simplificar su cálculo:

Ecuación 4-4 Linealización de cambio de incidencia en efectos crónicos

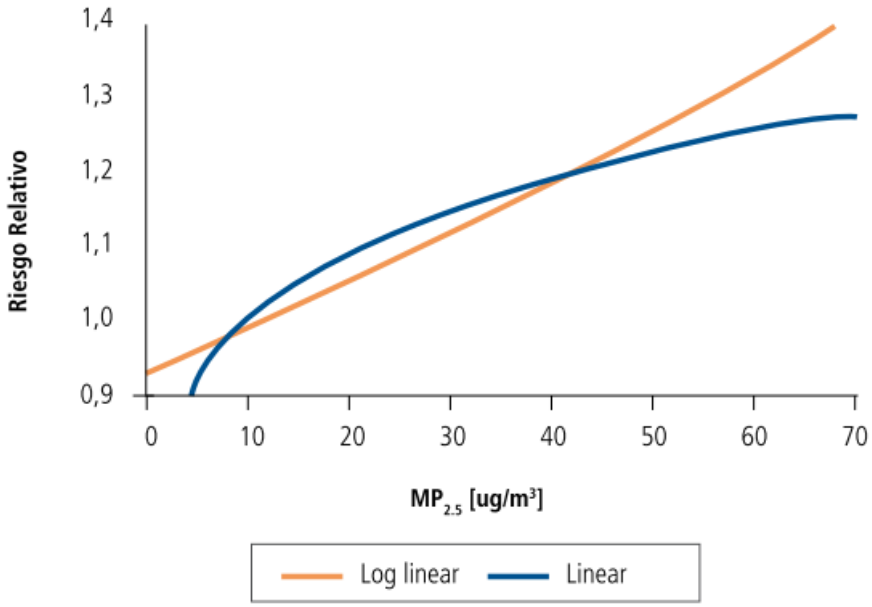
$$\Delta E_{ij}^{k} = \left[\exp(\beta_{ij}^{k} \cdot \Delta C^{k}) - 1\right] Pop_{j}^{k} IR_{ij} \cong \beta_{ij}^{k} \cdot \Delta C^{k} \cdot Pop_{j}^{k} \cdot IR_{ij}$$

Fuente: (GreenLabUC, 2011)

[66] Se debe tener especial cuidado de no realizar doble conteo al considerar niños e infantes, pues estos últimos son un subgrupo del primero.

Esta linealización del cambio en la incidencia, representada en la Ecuación 4-4, también se puede apreciar en la siguiente Figura 4-1 que utiliza como riesgo unitario (β) el correspondiente a la mortalidad cardiovascular en adultos mayores a 30 años.

Figura 4-1 Linealización de cambio de incidencia, ejemplo de riesgo unitario de mortalidad cardiovascular en adultos mayores a 30 años



Fuente: (MMA, 2015)

Según lo presentado en la Guía de AGIES de aire (2015), si el coeficiente de riesgo unitario es pequeño (y generalmente lo son) el error cometido al usar esta aproximación es pequeño (tal como se puede apreciar en la Figura 4-1), y despreciable frente a la incertidumbre de los parámetros. Por ejemplo, un valor típico de beta es de 0,001. Si se considera un cambio de 10 µg/m^3 en la concentración, el error porcentual de la aproximación es de 0,5%. Este valor es muy inferior al error estadístico del parámetro de riesgo unitario (2015).

De este modo, linealizando la curva se obtiene una gráfica como la que se presenta a continuación:

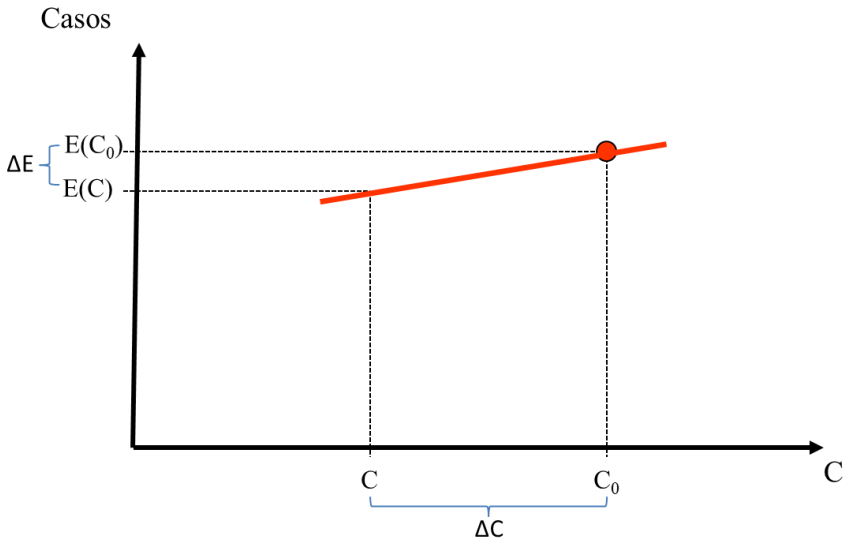


Figura 4-2 Ejemplo de la recta resultante de la linealización de la función Concentración-Respuesta
Fuente: Elaboración propia

4.1.1.2 Efectos de exposición aguda

Para obtener el cambio de incidencia en efectos agudos para el año completo, es necesario sumar los cambios de efectos para todos los días del año, como se muestra en la Ecuación 4-5:

Ecuación 4-5 Cambio de incidencia en efectos agudos

$$\Delta E_{ij}^{k} = \sum_{l=1}^{365} \Delta E_{ij}^{kl} = \sum_{l=1}^{365} \left[\beta_{ij}^{k} \cdot \Delta C^{kl} \cdot ND_{ij}^{kl} \right]$$

Fuente: (GreenLabUC, 2011)

Donde el índice l representa los días del año, por lo que ND_{ij}^{kl} representa el número base de efectos en el día l, y ΔC^{kl} representa el cambio de concentraciones ambientales en el día l (diario).

Si se asume que el número de efectos diario es constante durante todo el año, $ND_{ij}^{kl} = ND_{ij}^{k} = \frac{N_{ij}^{k}}{365}$, entonces es posible calcular el número total de efectos durante todo el año de la siguiente manera:

Ecuación 4-6 Efectos anuales de incidencia aguda

$$\Delta E_{ij}^{k} = \beta_{ij}^{k} \cdot ND_{ij}^{k} \sum_{l=1}^{365} \Delta C^{kl} = \beta_{ij}^{k} \cdot ND_{ij}^{k} \cdot 365 \Delta \overline{C}^{k} = \beta_{ij}^{k} \cdot N_{ij}^{k} \cdot \Delta \overline{C}^{k}$$

Fuente: (GreenLabUC, 2011)

Donde $\Delta \overline{C}^{k}$ corresponde a la suma de los cambios de concentración promedio diarias y, por lo tanto, al cambio en el promedio anual de la concentración del contaminante k y N_{ij}^{k} corresponde al número de efectos anuales.

De esta manera, la aplicación de la ecuación es similar para el cálculo de efectos crónicos, en que la unidad de análisis es un año completo, y el cálculo de efectos agudos, en que la unidad de análisis es un día. Es necesario recordar que esta es una aproximación, que asume que el número de efectos diarios es constante. Si el número de efectos diarios y los cambios en concentración están correlacionados, entonces esta suposición puede no ser válida.

A continuación, en la Tabla 4-1 se presenta un resumen de consideraciones para el cálculo de cambio de incidencia en efectos en salud a causa de la contaminación atmosférica.

Tabla 4-1 Resumen cambio de incidencia en efectos en salud a causa de la contaminación atmosférica

Características Función C-R	Exposición Crónica	Exposición Aguda
Parámetros C-R	Promedio anual	Promedio diario
Tasa Incidencia	Tasa anual	Tasa diaria
Cálculo	$\Delta E_{ij}^{k} = \beta_{ij}^{k} \cdot \Delta C^{k} \cdot Pop_{j}^{k} \cdot IR_{ij}$	$\Delta E_{ij}^{k\,k} = \beta_{ij}^{k} \cdot N_{ij}^{k} \cdot \Delta \overline{C}^{k}$

Fuente: (GreenLabUC, 2011)

4.1.1.3 Riesgo relativo

El riesgo relativo (RR), que está asociado a un cambio en la calidad del aire (ΔC), es el cociente entre la tasa de incidencia del efecto en salud y un valor de referencia (Jorquera, 2015). De esta manera, el riesgo relativo corresponde a:

Ecuación 4-7 Riesgo relativo

$$\boldsymbol{RR = \frac{\frac{E(C_1)}{Pop_j}}{\frac{E(C_0)}{Pop_j}} = \frac{e^{\beta\,(C_1)}}{e^{\beta\,(C_0)}} = e^{\beta\,(C_1 - C_0)} = e^{\beta\,\Delta C}}$$

Fuente: Elaboración propia

Donde C_0 es la concentración atmosférica inicial del contaminante y C_1 la concentración atmosférica final del contaminante en el ambiente, $E(C_i)$ es número de efectos debido a la concentración i del contaminante en análisis, y Pop_j es el grupo de población j bajo análisis.

Aproximando, bajo el mismo supuesto de linealización descrito en Sección 4.1.1.1.1 se puede estimar el riesgo relativo según:

Ecuación 4-8 Aproximación de la estimación del riesgo relativo

$$RR = e^{\beta \Delta C} \approx 1 + \beta \Delta C$$

Fuente: Elaboración propia

Si se considera una concentración atmosférica inicial (C_0) y dos concentraciones atmosféricas finales diferentes (C_1 y C_2), la variación del RR entre el RR_1 asociado a C_1 y el RR_2 asociado a C_2 está dada por:

Ecuación 4-9 Variación del riesgo relativo

$$\Delta RR = RR_2 - RR_1 = 1 + \beta (C_2 - C_0) - 1 - \beta (C_1 - C_0) = \beta (C_2 - C_1)$$
$$\Delta RR = \beta \Delta C$$

Fuente: Elaboración propia

En conclusión, bajo el supuesto de linealización, la variación del riesgo relativo se aproxima a una relación lineal entre la variación de concentración atmosférica del contaminante en análisis y el coeficiente de riesgo unitario (β).

En el contexto de estudios epidemiológicos y meta-análisis de estos estudios, junto con el riesgo relativo, se utiliza también el concepto de **cociente de riesgo (HR)**[67]. El HR es la tasa de riesgo del estudio y, por lo tanto, puede variar en el tiempo. En cambio, el RR es un valor "estático" y acumulativo, ya que resume el estudio y se obtiene al final de este (George et al., 2020). A pesar de esta diferencia, en algunos de los meta-análisis revisados los HR fueron considerados equivalentes a los RR (Chen & Hoek, 2020; Lee et al., 2020). Por lo anterior, para el análisis de la presente consultoría, ambos conceptos se tratan como equivalentes, aplicándose de la misma manera en la función de Concentración-Respuesta general (ver Ecuación 4-1).

En la presente consultoría, de acuerdo con lo conversado con la contraparte técnica, se propuso utilizar el método de riesgo incremental en la determinación de un posible criterio para ser incorporado en la evaluación de proyectos en el marco del SEIA. Es decir, se analizaría la relación entre el incremento en la concentración ambiental por un nuevo proyecto en evaluación en una zona saturada, y un riesgo considerado aceptable para cada contexto, relacionados entre sí por un coeficiente de riesgo unitario. Por lo anterior, la revisión bibliográfica de estudios nacionales

[67] Por su sigla en inglés, *Hazard Ratio*.

e internacionales de afectación a la salud realizada y presentada en este informe se enfocó en el levantamiento de dos antecedentes principales:

- El coeficiente de riesgo unitario (beta) (ver Sección 4.1.2), obtenido a partir de estudios epidemiológicos, y
- El riesgo aceptable (ver Sección 4.1.3).

Mientras que en la Sección 4.2 y la Sección 6.5 se explica que finalmente este criterio no será seleccionado para la recomendación.

4.1.2 Coeficiente de riesgo unitario (beta)

A continuación, se presentan los antecedentes compilados de coeficiente de riesgo unitario.

El coeficiente de riesgo unitario (el "*beta*") representa el efecto unitario en la salud humana de la concentración ambiental de contaminantes. El impacto es diferente para cada tipo de efecto en salud, el periodo de exposición y el segmento de población bajo estudio.

Los efectos en salud se pueden clasificar de distintas formas y niveles de detalle, pero se suelen diferenciar los efectos de mortalidad y morbilidad por separado. Dentro de la morbilidad se suelen agrupar en efectos de tipo acciones médicas (por ejemplo, admisiones hospitalarias y visitas a salas de emergencia), y restricciones de actividad (que puede ser, por ejemplo, total o leve).

Mientras que, junto con los efectos, se definen distintas causas asociadas para estos efectos, las que a su vez se suelen agrupar, por ejemplo, causas cardiopulmonares, respiratorias, o todas las causas, o se pueden manejar como causas específicas, como el asma o la pneumonía.

En cuanto a los periodos de exposición, la clasificación principal es entre efectos crónicos (en métrica de años), y efectos agudos (puede ser diario, para una cantidad de horas o hasta minutos).

Finalmente, los efectos pueden depender de la población afectada, por lo que en muchos casos se analizan segmentos de población diferenciados. Como se indicó en la sección de marco teórico (ver Sección 4.1.1.1), los segmentos utilizados generalmente son infantes (0-1 años), niños (0-17 años), adultos (18-64 años) y adultos mayores (mayores de 65 años), aunque en algunos estudios se usan grupos de edad definidos específicamente.

Cada una de estas clasificaciones y sus combinaciones tiene un coeficiente de riesgo unitario diferente (y es posible que no exista para todas sus combinaciones). De modo que se han desarrollado múltiples estudios para determinar las funciones de Concentración-Respuesta, y consiguientemente, los valores de los coeficientes de riesgo unitario para los efectos en salud

asociados a la concentración atmosférica de distintos contaminantes y en distintas poblaciones y países.

Si bien el parámetro de coeficiente de riesgo unitario es relevante, cabe mencionar que suele mantenerse dentro de un rango acotado y un orden de magnitud cercano a la milésima (10^{-3}), por lo que sus actualizaciones suelen no tener un gran impacto en el cálculo de los cambios en los efectos en salud (variación en el riesgo relativo), comparando con el efecto de los otros factores. Del mismo modo, es relevante enfatizar que este es un campo de conocimiento en continuo desarrollo, y no existe un valor definitivo, dado que este depende de los resultados y de la evolución del conocimiento científico.

Por lo anterior, y en el contexto de que el riesgo aceptable, el otro parámetro que se busca obtener de esta revisión, sí presenta variaciones de hasta 100 o 1.000 veces dependiendo del documento consultado, se enfocaron mayores esfuerzos en la compilación de antecedentes de riesgo aceptable en el desarrollo de estas actividades. Esto considerando también que dichas referencias no son tan fáciles de identificar en comparación.

De este modo, a continuación, se presentan las principales referencias utilizadas para la compilación de coeficientes de riesgo unitario para diferentes efectos, segmentos poblaciones y contaminantes atmosféricos. Cabe destacar que los dos primeros documentos presentados (ver Sección 4.1.2.1 y Sección 4.1.2.3) corresponden a compilaciones de estudios epidemiológicos, que incluyen en sus referencias tanto antecedentes nacionales como de países indicados en el artículo 11 del RSEIA, entre otros.

4.1.2.1 Guía metodológica para la elaboración de AGIES para instrumentos de calidad del aire

Tal como se indicó en la Sección 4.1.1, la Guía metodológica para la elaboración de un Análisis General del Impacto Económico y Social (AGIES) para instrumentos de calidad del aire (2015) define una metodología paso a paso para la elaboración de los AGIES de aire, en la que se presenta una sección específica para la estimación de los beneficios en salud asociados al instrumento de gestión de la calidad del aire en análisis. En dicha sección se presentan funciones Concentración-Respuesta recomendadas para el efecto en salud, las que provienen del estudio realizado por GreenLab (2011) y uno desarrollado por la Secretaría de Planificación de Transporte (SECTRA, 2012). A continuación se presentan las funciones Concentración-Respuesta propuestas en la guía, para los contaminantes $MP_{2,5}$ (ver Tabla 4-2), O_3 (Tabla 4-3), y SO_2 y NO_2 (Tabla 4-4).

Tabla 4-2 Funciones concentración respuesta recomendadas para la exposición a $MP_{2,5}$

Tipo Efecto	Efecto	Causa	Grupo Edad	Métrica	β	Incremento por 10 µg/m³	Fuente
Mortalidad Prematura Largo Plazo	Mortalidad Prematura	Todos	30+	Anual	0,0093	9,70%	Cifuentes et al. (2000)
					0,0094	9,80%	Pooled (Kreswski et al. 2000, La- den et al. 2006, Pope et al, 2002)
Mortalidad Prematura	Mortalidad Prematura	Todos	Todos	Media 24h	0,0012	1,20%	Cifuentes et al. (2000)
					0,0013	1,30%	Pooled (Kreswski et al. 2000, La- den et al. 2006, Pope 2002)
Acciones Médicas	Admisiones Hospitalarias	CHF[68]	65+	Media 24h	0,0031	3,10%	Ito (2003)
					0,0038	3,80%	Pooled (Ito 2003, Lippmann et al, 2000)
		DYS[69]	65+	Media 24h	0,0013	1,30%	Ito (2003)
					0,0017	1,70%	Pooled (Ito 2003, Lippmann et al, 2000)
		IHD[70]	65+	Media 24h	0,0014	1,40%	Ito (2003)
					0,0013	1,30%	Pooled (Ito 2003, Lippmann et al, 2000)
		CVD[71]	18-64	Media 24h	0,0015	1,50%	Moolgavkar (2000)
					0,0014	1,41%	Moolgavkar (2000)
			65+	Media 24h	0,0016	1,60%	Moolgavkar (2003)
					0,0016	1,58%	Moolgavkar (2003)
		PNEU [72]	65+	Media 24h	0,0040	4,10%	Ito (2003)
					0,0042	4,30%	Pooled (Ito 2003, Lippmann et al, 2000)
		CLD[73]	18-64	Media 24h	0,0024	2,40%	Moolgavkar (2000)
					0,0021	2,10%	Pooled (Moolgavkar 2003 (a), Moolgavkar 2003 (b))
			65+	Media 24h	0,0012	1,20%	Ito (2003)
					0,0011	1,10%	Pooled (Ito 2003, Moolgavkar 2003 (a), 2003 (b), 2000)
		ASTH[74]	0-64	Media 24h	0,0033	3,4%	Sheppard (2003)
	Visitas Salas Emergencia	ASTH	0-17	Media 24h	0,0166	18,0%	Norris et al. (1999)
					0,0165	18,0%	Norris et al. (1999)
		BRO[75]	0-17	Media 24h	0,0044	4,50%	Dockery et al. (1989)
Restricción Actividad	WLD	-	18-64	Media 24h	0,0046	4,70%	Ostro (1987)
	RAD	-	18-64	Media 24h	0,0048	4,90%	Ostro (1987)
	MRAD	-	18-64	Media 24h	0,0074	7,70%	Ostro and Rothschild (1989)

Nota: Estudios de EEUU y Canadá, excepto Cifuentes et al. (2000), de Santiago de Chile.

Fuente: (MMA, 2015)

Tabla 4-3 Funciones concentración respuesta recomendadas para la exposición a O_3

Tipo Efecto	Efecto	Causa	Grupo Edad	Métrica	β	Incremento por 10 µg/m³	Fuente
Mortalidad Prematura	Mortalidad Prematura	Todos	Todos	Media 24h	0,0015	1,50%	Bell et al. (2005)
					0,0015	1,51%	Bell et al. (2005)
Acciones Médicas	Admisiones Hospitalarias	RSP[76]	65+	Media 24h	0,0027	2,70%	Schwartz (1995)
		ASTH	Todos	Media 24h	0,0025	2,53%	Burnett et al. (1999)
		CLD	Todos	Media 24h	0,0030	3,05%	Burnett et al. (1999)
		PNEU	Todos	Media 24h	0,0020	2,02%	Burnett et al. (1999)
		DYS	Todos	Media 24h	0,0017	1,71%	Burnett et al. (1999)
	Visitas Salas Emergencia	ASTH	Todos	Máxima 8h	0,0009	0,90%	Peel et al. (2005)
Restricción Actividad	SLD	-	0-17	Máxima 8h	0,0082	8,50%	Gilliland et al. (2001)
	MRAD	-	18-64	Máxima 1h	0,0022	2,20%	Ostro and Rothschild (1989)

Nota: Estudios de EEUU y Canadá.

Fuente: (MMA, 2015)

Tabla 4-4 Funciones concentración respuesta recomendadas para la exposición a SO_2 y NO_2

Tipo Efecto	Efecto	Causa	Cont.	Grupo Edad	Métrica	β	Incremento por 10 µg/m³	Fuente
Acciones Médicas	Admisiones Hospitalarias	RSP	SO_2	65+	Media 24h	0,0008	0,8%	Schwartz et al. (2003)
		RSP	NO_2	65+	Media 24h	0,0032	3,3%	Fung et al. (2006)
		ASTH	SO_2	0-14	Media 24h	0,0050	5,1%	Wilson et al. (2007)
			SO_2	65+	Media 24h	0,0110	11,6%	Wilson et al. (2007)
			NO_2	75+	Media 24h	0,0135	14,5%	Villeneuve et al. (2007)
Restricción Actividad	EA	SLD	NO_2	4-12	Media 24h	0,0140	15,0%	O'Connor et al. (2008)
	MRAD	Tos	NO_2	7-14	Media 24h	0,0157	17,0%	Schwartz et al. (2003)

Nota: Estudios de EEUU y Canadá.

Fuente: (MMA, 2015)

4.1.2.2 Estudio de metodologías para la evaluación de normas de calidad y complemento a estimación de beneficios en salud derivados de la contaminación atmosférica

En el año 2018, la Subsecretaria del Medio Ambiente solicitó una consultoría sobre la evaluación de normas de calidad del aire y el efecto en la salud de esas normas, la cual fue desarrollada por

[68] Falla Cardioisquémica, por sus siglas en inglés *Congestive Heart Failure.*
[69] Disrritmia, por sus siglas en inglés *Dysrhythmia*.
[70] Enfermedad Cardioisquemica, por sus siglas en inglés *Isquemic Heart Disease*.
[71] Enfermedades Cardiovascular, por sus siglas en inglés *Cardiovascular Disease*.
[72] Pneumonía.
[73] Enfermedad Respiratoria Crónica, por sus siglas en inglés *Congestive Lung Disease*
[74] Asma, por sus siglas en inglés *Asthma*.
[75] Bronquitis Aguda.
[76] Enfermedades Respiratorias.

GreenLab. El estudio se tituló "Estudio de metodologías para la evaluación de normas de calidad y complemento a estimación de beneficios en salud derivados de la contaminación atmosférica" (GreenLab, 2018) y su objetivo principal fue diseñar una propuesta metodológica para la evaluación de normas de calidad del aire y complementar metodologías de efectos en salud que se utilizaban en las evaluaciones económicas de estas normas. En particular, uno de los objetivos específicos de este estudio fue recopilar y sistematizar nuevos estudios sobre efectos en salud por contaminación atmosférica y por ese propósito se realizó una actualización de los valores de coeficientes de riesgo unitario. En la Tabla 4-5 se observan los coeficientes unitarios recopilados en la consultoría mencionada. Los valores de betas están actualizados en comparación con a los señalado en la Guía de AGIES en la Tabla 4-2, Tabla 4-3 y Tabla 4-4 (Sección 4.1.2.1), siendo en algunos casos menores.

Tabla 4-5 Funciones concentración respuesta recomendadas para la exposición a $MP_{2,5}$, según la consultoría desarrollada por GreenLab (2018) para el MMA

Tipo Efecto	Efecto	Causa	Grupo Edad	Métrica	β	RR por 10 µg/m³	Fuente
Mortalidad prematura	Mortalidad prematura	Todas	25+	Media 24h	0,0131	1,14	Lepeule et al., 2012
		Todas	30+	Media 24h	0,0058	1,060	Krewski et al., 2009
		Todas	0-1	Media 24h	0,0039	1,040	Woodruff et al., 1997
Acciones médicas	Admisiones Hospitalarias	ASTH	0-64	Media 24h	0,0033	1,034	Sheppard, 2003
		CVD	18-64	Media 24h	0,0014	1,014	Moolgavkar, 2000
		CVD	65+	Media 24h	0,0016	1,016	Moolgavkar, 2003
		RSP crónica	18-64	Media 24h	0,0022	1,022	Moolgavkar, 2003
			65+	Media 24h	0,012	1,012	K Ito, 2003
		PNEU	65+	Media 24h	0,0040	1,041	K Ito, 2003
	Visitas médicas	BRO	8-12	Media 24h	0,0272	1,313	Dockery et al., 1996
	Visitas sala emergencias	ASTH	0-17	Media 24h	0,0165	1,180	Norris et al., 1999
Restricción Actividad	RAD	Todas	18-64	Media 24h	0,0048	1,049	B D Ostro, 1987
	MRAD	Todas	18-64	Media 24h	0,0074	1,077	Bart D. Ostro y Rothschild, 1989
	WLD	Todas	18-64	Media 24h	0,0046	1,047	B D Ostro, 1987

Fuente: (GreenLab, 2018)

Tabla 4-6 Funciones concentración respuesta recomendadas para la exposición O_3, según la consultoría desarrollada por GreenLab (2018) para el MMA

Tipo Efecto	Efecto	Causa	Grupo Edad	Métrica	β	RR por 10 µg/m³	Fuente
Mortalidad prematura	Mortalidad prematura	RSP	30+	Máxima 8h	0,0045	1,046	Jerret et al., 2009
		Todas	0-99	Máxima 8h	0,0008	1,008	Bell et al., 2005
Acciones médicas	Admisiones Hospitalarias	RSP	65+	Máxima 8h	0,0034	1,034	J Schwartz, 1995
	Visitas Sala emergencias	ASTH	0-99	Máxima 8h	0,0009	1,009	Peel et al., 2005
Restricción actividad	MRAD	Todas	18-64	Máxima 8h	0,0026	1,026	Ostro y Rothschild, 1989
	SLD	Todas	5-17	Máxima 8h	0,0078	1,081	Gilliland et al., 2001

Fuente: Elaboración propia

4.1.2.3 Contaminación del aire por partículas finas y mortalidad humana: más de 25 años de estudios de cohortes

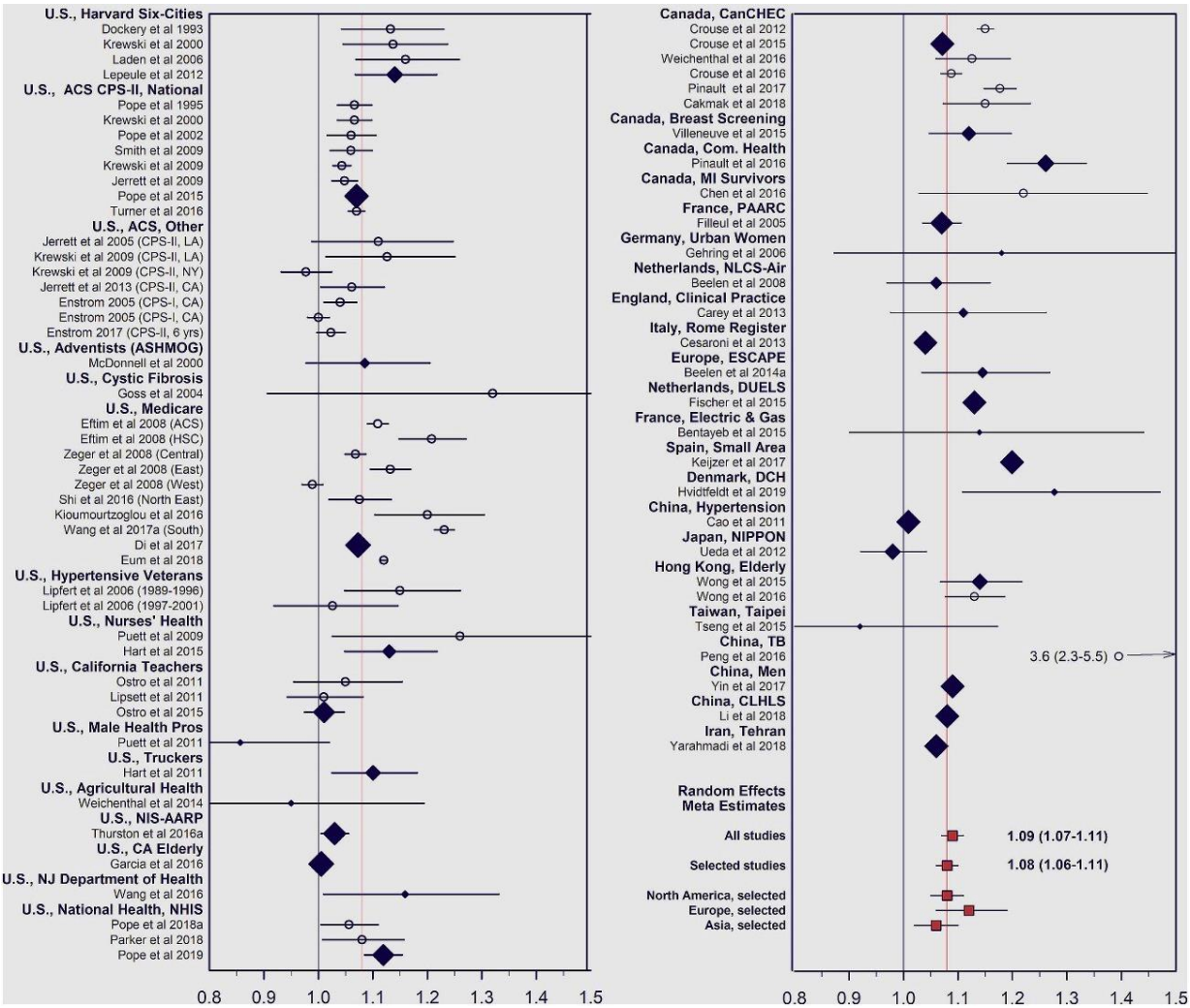
En el documento "Contaminación del aire por partículas finas y mortalidad humana: más de 25 años de estudios de cohortes" (Pope et al., 2020), los autores elaboran una compilación y resumen de los hallazgos de estos estudios de supervivencia de cohortes de individuos utilizando herramientas meta-analíticas.

En dicho documento, se compilan y analizan desde los primeros estudios de cohortes en la materia, a saber (Dockery et al., 1993) y (Pope et al., 1995). En el caso de Dockery et al. (1993), se analizó una cohorte de 8.000 adultos en un periodo de 14 a 16 años para seis ciudades consideradas representativas de la calidad del aire en EE.UU. En este caso se monitoreó el impacto de las PST, MP_{10}, $MP_{2,5}$, SO_4 (partículas de sulfato), H+ (aerosoles de fuerte acidez), SO_2, NO_2 y O_3. Se utilizaron modelos de regresión para estimar el cociente de riesgo (HR)[77], controlando por edad, sexo, fumadores activos de cigarros, masa corporal, educación y exposición ocupacional. La estimación del cociente de riesgo para mortalidad por todas las causas obtenida es de 1,13 (IC 95% entre 1,04 y 1,23) y 1,18 para mortalidad cardiopulmonar (IC 95% entre 1,06 y 1,32), por elevación de 10 µg/m^3 de $MP_{2,5}$. Los resultados de este estudio motivaron la realización del análisis de Pope et al. (1995) para una cohorte cercana a 500.000 adultos de 151 áreas metropolitanas de EE.UU., para evaluar el efecto del $MP_{2,5}$ y el SO_2, controlando por edad, sexo, raza, fumadores activos de cigarros, pipas y puros, fumadores pasivos, masa corporal, educación, exposición ocupacional, y consumo de alcohol. El resultado de este estudio fue un cociente de riesgo de 1,07 (IC 95% entre 1,04 y 1,10) en mortalidad por todas las causas y 1,12 (IC 95% entre 1,07 y 1,17) para mortalidad cardiopulmonar, por elevación de 10 µg/m^3 de $MP_{2,5}$.

Los resultados de estos estudios fueron controversiales, por una parte, debido a que los efectos en mortalidad estimados son mucho mayores a lo que se esperaba, y, por otra parte, porque los datos de trasfondo en estos análisis estaban protegidos por acuerdos de confidencialidad. Sin embargo, a la fecha se han realizado nuevos análisis independientes y análisis extensos y sustanciales de estos estudios, los que han obtenido resultados cercanos significativos en todos los casos (ver U.S.Harvard Six-Cities y U.S. ACS CPS-II National en la Figura 4-3, respectivamente).

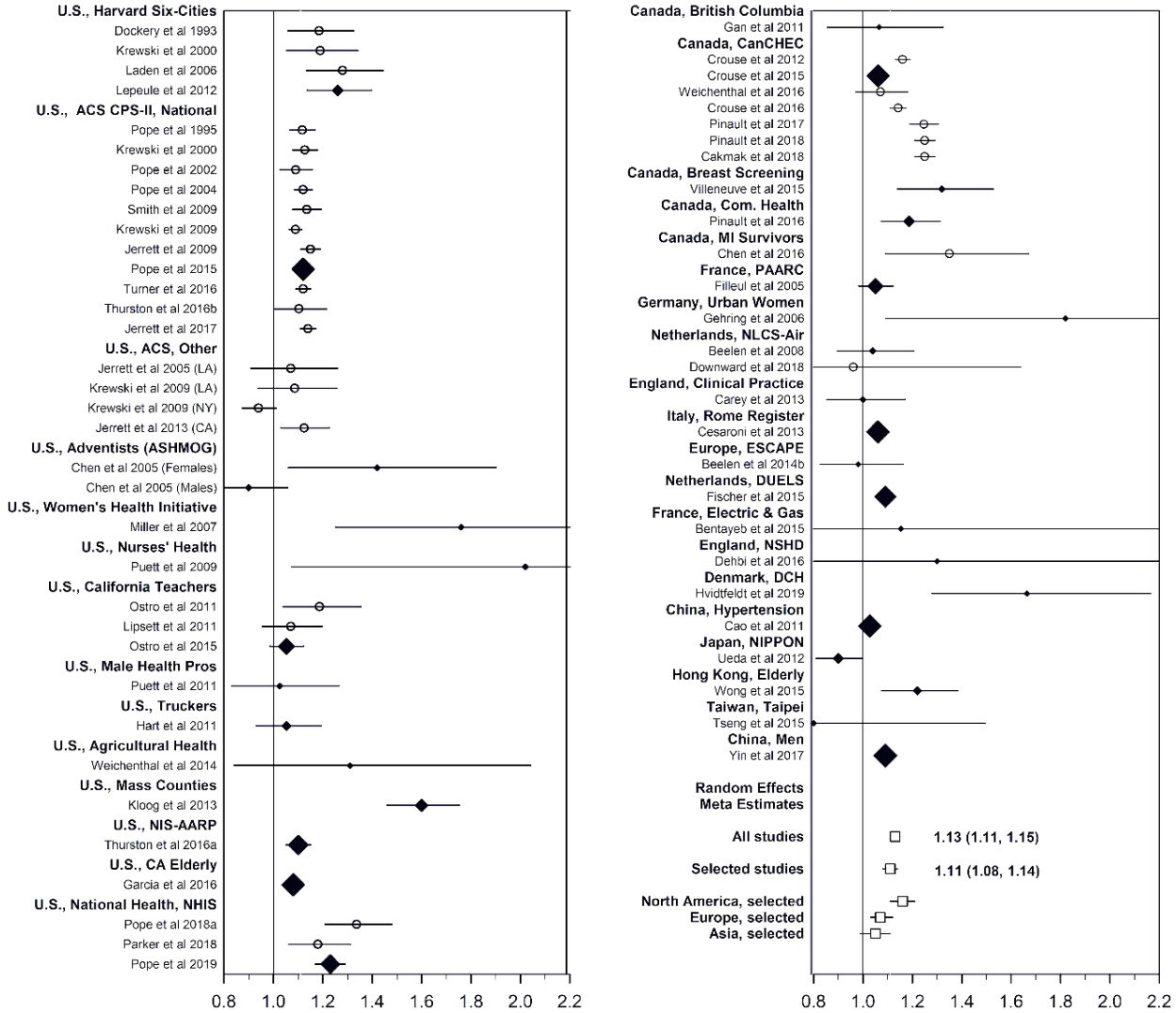
Junto con lo anterior, se han publicado muchos estudios adicionales que utilizan una amplia variedad de cohortes, incluidas cohortes construidas a partir de datos públicos y aprovechando experimentos naturales. Los resultados de los estudios compilados en (Pope et al., 2020) se presentan en la Figura 4-3, Figura 4-4 y Figura 4-5 para la mortalidad por todas las causas, por cáncer cardiopulmonar y de pulmón, respectivamente. En este estudio se recopilaron y analizaron los resultados de estudios de EE.UU., Canadá, Países Bajos, Francia, Alemania, Inglaterra, España, Dinamarca, una cohorte de países de Europa (incluyendo Suecia, Finlandia, Noruega, Austria, Suiza, Italia, y Grecia), así como de Japón, Irán, China continental, Hong-Kong y Taiwán.

[77] No confundir con el coeficiente de riesgo (beta). Para su comparación ver Sección 4.1.1.3.



Nota 1: Los diamantes negros representan estudios seleccionados. El tamaño del diamante es proporcional al peso relativo del estudio en la estimación del efecto aleatorio. Los cuadrados rojos representan metaestimaciones de efectos aleatorios. La línea negra es una línea de referencia en riesgo relativo igual a 1. La línea roja es una línea de referencia en RR es igual a la metaestimación de efectos aleatorios utilizando los estudios seleccionados (Enstrom, 2005, 2017, Jerrett et al., 2005, 2013; Peng et al., 2017).
Nota 2: Estudio Europe, ESCAPE (Beelen et al., 2014), utiliza datos de Suecia, Finlandia, Noruega, Dinamarca, Países Bajos, Alemania, Austria, Suiza, Francia, Italia, España y Grecia.

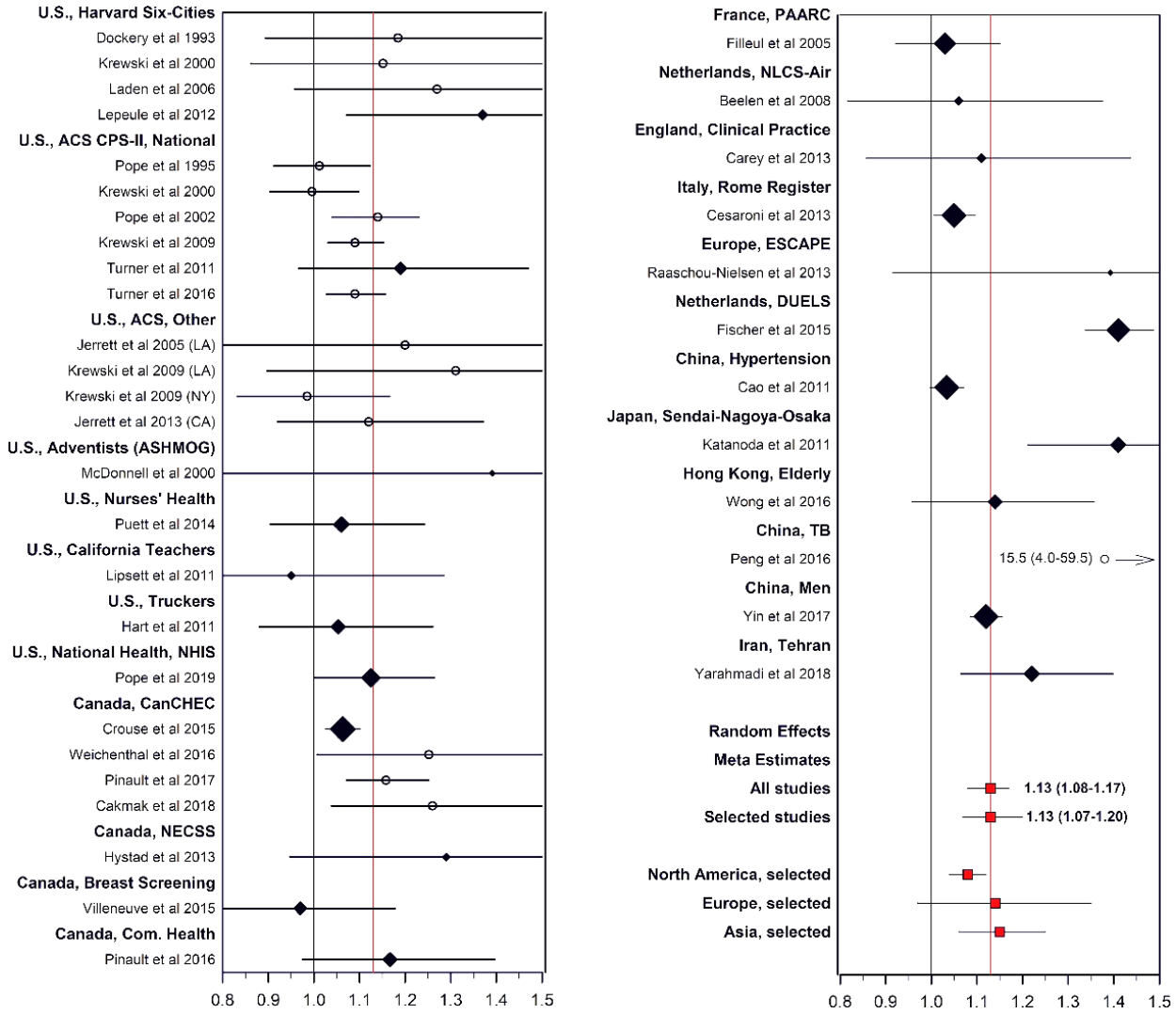
Figura 4-3 Cocientes de riesgo (HR) ajustados estimados (e IC del 95%) para la mortalidad por todas las causas por elevación de 10 µg/m^3 en $MP_{2,5}$ de múltiples estudios de cohortes
Fuente: (Pope et al., 2020)



Nota 1: Los diamantes negros representan estudios seleccionados con el tamaño del diamante proporcional al peso relativo en la estimación del efecto aleatorio utilizando estudios seleccionados. Los cuadrados blancos representan metaestimaciones de efectos aleatorios utilizando los estudios seleccionados (Gan et al., 2011; Kloog et al., 2013). La línea negra es una línea de referencia en riesgo relativo igual a 1.
Nota 2: Estudio Europe, ESCAPE, utiliza datos de Suecia, Finlandia, Noruega, Dinamarca, Países Bajos, Alemania, Austria, Suiza, Francia, Italia, España y Grecia.

Figura 4-4 Cocientes de riesgo (HR) ajustados estimados (e IC del 95%) para mortalidad cardiopulmonar/cardiovascular por elevación de 10 µg/m^3 en $MP_{2,5}$ de múltiples estudios de cohortes

Fuente: (Pope et al., 2020)



Nota: Los diamantes negros representan estudios seleccionados con el tamaño del diamante proporcional al peso relativo en la estimación del efecto aleatorio utilizando estudios seleccionados. Los cuadrados rojos representan metaestimaciones de efectos aleatorios. La línea negra es una línea de referencia en riesgo relativo igual a 1. La línea roja es una línea de referencia en RR es igual a la metaestimación de efectos aleatorios utilizando los estudios seleccionados (Hystad et al., 2013).

Figura 4-5 Cocientes de riesgo (HR) ajustados estimados (e IC del 95%) para la mortalidad por cáncer de pulmón por elevación de 10 µg/m³ en MP2,5 de múltiples estudios de cohortes

Fuente: (Pope et al., 2020)

Las estimaciones meta-analíticas, elaboradas en (Pope et al., 2020), de la media de la distribución de los efectos de los estudios de cohortes que están disponibles actualmente, proporcionan evidencia sustancial de las asociaciones adversas de la contaminación del aire por $MP_{2,5}$ con la mortalidad por todas las causas, mortalidad por cáncer cardiopulmonar y mortalidad por cáncer de pulmón. En este estudio se estimaron valores considerando todos los estudios, y también se realizó la estimación de una selección de estudios sin considerar estudios de cohortes específicas (ej. pacientes con fibrosis quística) ni que fuesen de cohortes similares. Del mismo modo, también se obtuvieron valores para segmentos poblacionales por zona geográfica (Europa, Asia y Norteamérica), y para grupos de estudios que cumplan con haber controlado ciertas variables de control específicas. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 4-7. En esta se puede observar que el cociente de riesgo varía entre 1,07 y 1,12 entre diferentes zonas geográficas, mientras que en los estudios que controlan por variables meteorológicas/climáticas es de 1,14 (1,05-1,24 IC 95%) considerando seis estudios, y de 1,07 (1,07-1,08 IC 95%) considerando tres estudios selectos. Como se puede observar, los valores obtenidos como resultados de Pope et al. son significativos al 95% con valores del rango inferior mayores a 1 [78]. Adicionalmente, en el Anexo 5 (Sección 0) se muestran los cocientes de riesgo unitario asociados a los cocientes de riesgos obtenidos en este estudio.

Tabla 4-7 Meta-estimaciones de efectos aleatorios (cocientes de riesgo ajustados e IC del 95%) para la mortalidad por todas las causas (por elevación de 10 µg/m³ en $MP_{2,5}$) utilizando todos los estudios y estudios seleccionados para diferentes regiones del mundo y para estudios que controlaron por distintas variables

Tipos de estudios	Cantidad de estudios	Cociente de riesgo (HR)	(IC 95%)
Todos los estudios	75	1,09	(1,07–1,11)
Estudios seleccionados	33	1,08	(1,06–1,11)
Todos los estudios, Norteamérica	56	1,09	(1,07–1,11)
Todos los estudios, Europa	10	1,12	(1,06–1,19)
Todos los estudios, Asia	9	1,07	(1,04–1,11)
Estudios seleccionados, Norteamérica	16	1,08	(1,05–1,11)
Estudios seleccionados, Europa	10	1,12	(1,06–1,19)
Estudios seleccionados, Asia	7	1,06	(1,02–1,10)
Todos los estudios, con variables individuales del tabaquismo	52	1,07	(1,06–1,09)
Estudios seleccionados, con variables individuales del tabaquismo	25	1,08	(1,06–1,10)
Todos los estudios, con variables ecológicas/contextuales	45	1,09	(1,07–1,11)
Estudios seleccionados, con variables ecológicas/contextuales	19	1,08	(1,05–1,12)
Todos los estudios, con variables meteorológicas/climáticas	6	1,14	(1,05–1,24)
Estudios seleccionados, con variables meteorológicas/climáticas	3	1,07	(1,07–1,08)

Fuente: (Pope et al., 2020)

[78] Si este valor fuese menor a 1, significaría que existe la posibilidad de que el riesgo debido al aumento de la concentración del contaminante sea menor que el de riesgo inicial, lo cual no sería coherente con la evidencia científica en esta materia.

4.1.2.4 Referencias asociadas a los efectos del MP_{10}

Respecto al MP_{10} se revisaron los dos artículos considerados por la Organización Mundial de la Salud (OMS) para establecer sus recomendaciones de calidad del aire (WHO, 2021b). Ambos artículos corresponden a una recopilación de estudios sobre efectos en la salud, de corto y largo plazo respectivamente, de diferentes contaminantes incluido el MP_{10}.

En primer lugar, el artículo de Orellano et al. (2020) selecciona estudios sobre mortalidad de diferentes causas y exposición de corto plazo a MP_{10}, $MP_{2,5}$, O_3 y NO_2. En dicho estudio se consideraron estudios de corto plazo aquellos en que el tiempo de exposición se encuentra entre 1 hora y 7 días. Los resultados del análisis fueron los riesgos relativos por un incremento de 10 $\mu g/m^3$ de contaminante para los efectos de mortalidad por todas las causas, mortalidad cardiovascular (CSV, por sus siglas en inglés), mortalidad respiratoria (RSP) y mortalidad cerebrovascular (Tabla 4-8).

Tabla 4-8 Riesgo relativo asociado a un incremento de 10 $\mu g/m^3$ de MP_{10} desde 1 hora hasta 7 días, según su efecto en la salud

Efecto	Causa	Riesgo relativo (IC 95%)	P-value[79]
Mortalidad prematura	Todas	1,0041 (1,0034 – 1,0049)	<0,0001
	CSV	1,0060 (1,0044 – 1,0077)	<0,0001
	RSP	1,0091 (1,0063 – 1,0119)	<0,0001
	Mortalidad cerebrovascular	1,0044 (1,0022 – 1,0066)	0,0005

Fuente: (Orellano et al., 2020)

En segundo lugar, los autores Chen y Hoek (2020) realizan una recopilación y meta-análisis de estudios sobre efectos de largo plazo por exposición a MP_{10} y $MP_{2,5}$. En este estudio consideraron estudios de largo plazo aquellos que analizaban exposiciones entre meses y años. La recopilación incluyó los siguientes efectos en salud por exposición de largo plazo a MP:

- Mortalidad no accidental.
- Mortalidad por enfermedades circulatoria.
- Mortalidad por cardiopatías isquémicas (IHD, por sus siglas en inglés).
- Mortalidad por enfermedades cardiovasculares (CVD, por sus siglas en inglés).
- Mortalidad por enfermedades respiratorias (RSP).
- Mortalidad por enfermedades pulmonares obstructivas crónicas (COPD, por sus siglas en inglés).
- Mortalidad por cáncer al pulmón.

Los resultados del meta-análisis se resumen en la Tabla 4-9. Estos se presentan como RR por un incremento de 10 $\mu g/m^3$.

[79] Los p-values indican la significancia de los resultados. En este caso todos los p-values son menores a 0,05, por lo tanto, los resultados (riesgos relativos) son significativos al 95%.

Tabla 4-9 Riesgo relativo asociado a un incremento de 10 µg/m³ de MP_{10} en plazos de meses y años, según su efecto en la salud

Efecto	Causa	Riesgo relativo (IC 95%)
Mortalidad prematura	No accidental	1,04 (1,03 – 1,06)
	Enfermedades circulatorias*	1,04 (0,99 – 1,10)
	IHD	1,06 (1,01 – 1,10)
	CVD*	1,01 (0,83 – 1,21)
	RSP	1,12 (1,06 – 1,19)
	COPD*	1,19 (0,95 – 1,49)
	Cáncer al pulmón	1,08 (1,04 – 1,13)

(*) Los RR para estas enfermedades no tienen una relación significativa con el incremento de MP_{10} debido a que el límite inferior del intervalo de RR inferior es menor a 1.

Fuente: (Chen & Hoek, 2020)

Adicionalmente, en el estudio de Pope (2002) se indica que la fracción gruesa del MP y las partículas suspendidas totales no tienen una relación consistente con la mortalidad para el caso de los efectos crónicos, a diferencia del $MP_{2,5}$, que si presenta una relación estadística significativa con la mortalidad. Sumado a lo anterior, en el año 2006 la USEPA revocó el estándar de calidad del aire que regulaba la concentración de MP_{10} anual debido a falta de evidencia científica sobre los efectos a largo plazo del MP_{10} sobre la salud de las personas (U.S. Environmental Protection Agency, 2020).

4.1.2.5 Referencias asociadas a los efectos del CO

En el año 2021, la OMS publicó nuevas recomendaciones sobre los valores de calidad del aire para los contaminantes MP_{10}, $MP_{2,5}$, NO_2, SO_2 y monóxido de carbono (CO) (WHO, 2021a). En la sección 3.7 de dicho documento se mencionan las recomendaciones para el contaminante CO y el procedimiento con el cual se obtuvo el valor límite para este contaminante. La información utilizada para obtener el valor **límite de CO** proviene del estudio "*Short-term exposure to carbon monoxide and miocardio infarction: A systematic review and meta-analysis* "(Lee et al., 2020), en el cual los autores realizan una revisión sistemática de los efectos del incremento de CO en las admisiones hospitalarias y la mortalidad por infartos al miocardio. En el meta-análisis se incluyeron 26 estudios y se realizó una estandarización de los resultados de estos estudios. De este meta-análisis se concluye que un **incremento de 1 mg/m³ de CO está asociado a un RR de 1,052 (IC 95%: 1,017 – 1,089).**

4.1.2.6 Referencias asociadas a los efectos del Pb

En 2008 se publicó el reglamento final del estándar nacional de calidad del aire para el plomo (Pb) en Estados Unidos (US Environmental Protection Agency, 2008). En este reglamento se menciona que la selección del límite de Pb en el aire se basó en la **reducción de Coeficiente Intelectual** (IQ por sus siglas en inglés) **en niños** provocado por la concentración de este contaminante en el aire. La normativa de este reglamento se fundamenta en los antecedentes recopilados en los documentos "*Criteria Document*" (US Environmental Protection Agency, 2006)

y "*Staff Paper*" (US Environmental Protection Agency, 2007), y en consejos del Comité Asesor Científico de Aire Limpio (CASAC por sus siglas en inglés).

Para establecer el estándar de calidad del aire se consideraron los siguientes parámetros y consideraciones:

1. Grado de protección en términos de pérdida de IQ en niños: se definió un valor de dos puntos de pérdida de IQ como aceptable.
2. Funciones de Concentración-Respuesta que relacionen la concentración de Pb en la sangre con la pérdida de IQ en niños: se consideró la mediana de las cuatro curvas C-R que presentan niveles de Pb en la sangre más cercanos a los de los niños estadounidenses en esa época (Tabla 4-10).
3. Relación concentración en la aire a la concentración en la sangre: se consideró una relación de 1:7 (aire:sangre), que es el valor central de un rango de relaciones aire-sangre bien respaldadas.

Tabla 4-10 Resumen de la relación cuantitativa entre el IQ y el Pb en la sangre de análisis que presentan niveles de Pb en la sangre más cercanos a los de los niños estadounidenses en esa época

Rango de niveles de Pb en la sangre [µg/dL]	Promedio de la pendiente [puntos de IQ por µg/dL]
0,8 – 4,9	-1,71
0,9 – 7,4	-2,94
0,5 – 8,4	-1,79
1,0 – 9,3	-1,56

Fuente: (US Environmental Protection Agency, 2008)

Con los parámetros y consideraciones mencionados en el párrafo anterior, la USEPA obtiene el **valor límite de 0,15 µg/m³ de Pb** que se establece en los NAAQS. A diferencia de la normativa de calidad del aire de otros contaminantes, el límite de plomo está definido por una pérdida de IQ aceptable y no según un nivel de riesgo aceptable. De este modo, este contaminante se diferencia de los otros por tener un límite o umbral definido, lo que se debe a que se considera que su efecto principal es sobre el desarrollo cognitivo en niños, a pesar de que se reconoce que puede tener propiedades cancerígenas.

4.1.3 Riesgo aceptable

En esta sección se hizo una revisión de literatura internacional sobre los estándares de riesgo aceptable. Se entenderá el riesgo aceptable como el nivel de riesgo que es tolerable para una sociedad[80]. Definir este nivel de riesgo es importante para establecer qué cambio de

[80] Esta definición de "riesgo aceptable"se obtiene a partir del análisis del documento "*Towards an Acceptable Criterion of Acceptable Risk*" (Milvy, 1987). En la Sección **Error! Reference source not found.** se explica en mayor profundidad este documento.

contaminación no se considera como significativo, por generar un cambio en el riesgo que es aceptable.

En este aspecto, es relevante destacar que tanto la literatura científica como los documentos oficiales de Estados que se pudieron compilar en esta materia no siempre detallan cómo fueron definidos ni cómo considerar o utilizar los riesgos definidos como aceptables o despreciables. Lo anterior guarda relación con el hecho de que afirmar que un nivel de riesgo para la sociedad es aceptable conlleva implicancias políticas y económicas que pueden ser complejas.

En la presente sección se presentan todos los antecedentes tanto de trasfondo como de propuesta de uso relativos a los riesgos aceptables identificados en esta revisión, sin embargo, por el motivo previamente descrito, en algunos casos no fue posible obtener el detalle requerido de las referencias revisadas.

4.1.3.1 Francia – Evaluación del estado del medio ambiente y riesgos para la salud, Departamento de Sitio y Territorio

La guía "Evaluación del estado del medio ambiente y los riesgos para la salud: Enfoque integrado de gestión de emisiones de sustancias químicas por instalaciones clasificadas" (Institut national de l'environnement industriel et des risques, 2013) tiene como objetivo presentar y restaurar las metodologías existentes para la evaluación de los riesgos a la salud e interpretar el estado del medio ambiente. Esta guía fue elabora entre el Departamento de Sitio y Territorio, y el Instituto Nacional de Riesgos Industriales y Ambientales (INERIS). En este documento se presentan criterios basados en dos indicadores de riesgos: el **cociente de peligro** (QD por sus siglas en inglés) y **exceso de riesgo individual** (ERI). Por un lado, el cociente de peligro es la relación entre la concentración de exposición[81] y concentración de referencia,[82] que se utiliza para caracterizar el riesgo de efectos sistémicos relacionados con sustancias tóxicas. Por otro lado, el exceso de riesgo individual es la probabilidad adicional, en comparación con un sujeto no expuesto, de que un individuo contraiga cáncer si está expuesto a lo largo de su vida a una dosis unitaria (o concentración) de un carcinógeno.

Para obtener estos indicadores se utilizan las fórmulas descritas en la Tabla 4-11.

Tabla 4-11 Cálculo de cociente de peligro y exceso de riesgo individual

Cociente de peligro	Exceso de Riesgo Individual
$QD = \frac{CI}{VTR_{AS,\,inh}}$	$ERI = \sum CI_i \; x \frac{T_i}{T_m} \; x \, VTR_{SS,inh}$

Fuente: (Institut national de l'environnement industriel et des risques, 2013)

[81] La concentración de exposición corresponde a la concentración ambiental en el aire inhalado al que está expuesto el receptor en promedio durante el tiempo de exposición. Se expresa en masa (mg o µg) por unidad de volumen de aire (m^3).
[82] La concentración de referencia corresponde a la concentración definida en los estándares de calidad del aire.

Donde CI es la concentración media inhalada[83] (mg/m^3), $VTR_{AS,\,inh}$ es el valor toxicológico de referencia[84] en el umbral para inhalación, $VTR_{SS,inh}$ es el exceso de riesgo unitario que es el valor de referencia toxicológico sin umbral, y $\frac{T_i}{T_m}$ en la proporción del periodo de la exposición al contaminante en relación con la duración de la vida de las personas (es decir, la esperanza de vida).

Para determinar qué criterio utilizar, en el documento referenciado se establecen tres tipos de clasificaciones según la comparación entre la calidad ambiental actual de la zona y la de referencia según la norma (ver primera columna Tabla 4-12), diferenciando si la concentración supera la norma, se encuentra bajo ella o si la relación entre la concentración y la norma es incierta, por ejemplo, si existe una falta de representatividad de las mediciones o incertidumbres analíticas. Si el lugar no tiene concentraciones ambientales de referencia, por ejemplo, un contaminante que no está todavía regulado por la norma, entonces se definen los criterios descritos en la Tabla 4-12 (ver tercera columna), según los valores calculados para el cociente de peligro y el exceso de riesgo individual. En la Tabla 4-12, en la cuarta columna, se muestra la clasificación de la zona de acuerdo con los criterios definidos.

Tabla 4-12 Interpretación de la comparación entre la calidad ambiental actual y la de referencia

Comparación entre C y C_{ref}		Cuantificación del riesgo (en ausencia de valores de C_{ref})	Interpretación
C < C_{ref}		QD < 0,2 ERI <10^{-6}	El estado del medio ambiente es **compatible** con los usos de suelo, por ejemplo, una escuela.
Relación entre C y C_{ref} es incierta	**o**	0,2 < QD < 5 10^{-6} < ERI < 10^{-4}	Entorno **vulnerable**. Zona de incertidumbre, que requiere una mayor reflexión.
C > C_{ref}		QD > 5 ERI > 10^{-4}	El estado del medio ambiente **no es compatible** con los usos del suelo.

Fuente: (Institut national de l'environnement industriel et des risques, 2013)

Luego, el criterio general para establecer si un proyecto es aceptable o no es que el valor del cociente de peligro y el de exceso de riesgo individual tienen que ser menores a 1 y 10^{-5} respectivamente. Sin embargo, la resolución final sobre el proyecto va a depender del estado en que se encuentre la zona según la clasificación indicada en la Tabla 4-12. En la Tabla 4-13 se observan los criterios y resoluciones finales según las definiciones de la guía.

[83] $CI = \sum_i C_i \, x \, \frac{t_i}{T}$, donde C_i es la concentración de contaminante en el aire inhalado durante una fracción de tiempo i (en mg/m^3) y $\frac{t_i}{T}$ es la fracción del tiempo de exposición a la concentración C_i durante el período de exposición T.

[84] Los valores toxicológicos de referencia son los valores con los que se establece una relación entre la dosis y un efecto (con umbral) de cierto contaminante o una relación entre una dosis y una probabilidad de aparición de un efecto (sin umbral). Estos valores son específicos para un efecto, una duración y vía de exposición.

Tabla 4-13 Criterios de aceptabilidad

Estado de Uso	Resultados del ERS	Resolución	Seguimiento por realizar
Compatible	QD < 1 ERI < 10^{-5}	Aceptable	Establecimiento de las condiciones de descarga según las hipótesis del estudio.
Posiblemente vulnerable	QD < 1 ERI < 10^{-5}	Sin preocupaciones, sujeto a un seguimiento suficiente	Establecimiento de condiciones de vertido más estrictas, posiblemente en función de las sustancias incriminadas.
Incompatible **C > C_{ref}**	QD < 1 ERI < 10^{-5}	Caso por caso: adecuación de las condiciones al contexto ambiental y sanitario	Establecimiento de condiciones de vertido más estrictas, posiblemente en función de las sustancias incriminadas.
Compatible, Posiblemente vulnerable, o Incompatible	En otro caso	No aceptable	Revisar el proyecto.

Fuente: (Institut national de l'environnement industriel et des risques, 2013)

4.1.3.2 Países Bajos – Hacer frente a los riesgos, Cámara de los representantes y Decreto sobre seguridad externa de los establecimientos (2004)

En el documento "Hacer frente a los riesgos" (Tweede Kamer der Staten-Generaal, 1988), de la Cámara de los representantes de los Países Bajos, se elabora la metodología de la política con enfoque al riesgo. Este enfoque está orientado a que los riesgos de efectos adversos por contaminación ambiental deben ser insignificantes. En el documento se establecen límites máximos permisibles y límites insignificantes para diferentes tipos de exposiciones, por ejemplo, a sustancias y radiación. Adicionalmente, se mencionan los límites de riesgos para humanos como para el ecosistema. A continuación, se detallan los límites definidos en función de la protección de la salud humana.

Para el caso de sustancias cancerígenas o sin umbral, el límite máximo permisible de riesgo individual[85] definido en el documento es 10^{-6} anual, mientras que el límite que se considera insignificante es 10^{-8} anual.

En el año 2004 se publicó el decreto (Ministerie van Volkshuisvesting, 2004) que contiene los requisitos de calidad ambiental para la seguridad externa de los establecimientos[86]. En este decreto se establece que el límite de riesgo individual aceptable al que un receptor puede estar expuesto en el perímetro cercano al establecimiento es de 10^{-6} anual.

[85] El riesgo individual es la probabilidad de que una persona experimente un efecto adverso particular como resultado de la exposición a un agente (expresada en unidades de probabilidad por año o relacionada con una concentración medida por año).
[86] El detalle de estos establecimientos está en el artículo 2 del decreto.

4.1.3.3 Estados Unidos – primeros estudios: Milvy (1987) y Whipple (1988)

El artículo "Hacia un criterio aceptable de riesgo aceptable" (Milvy, 1987) trata de abordar la **paradoja del riesgo aceptable**, ya que este concepto tiene una parte que es cuantitativa y objetiva que es la referida al "riesgo" y una parte más subjetiva y de la cual es difícil llegar a un acuerdo, que se refiere al adjetivo "aceptable". En general, el criterio de aceptabilidad se establece según una tasa de riesgo (tasa de por vida). Sin embargo, Milvy establece que el criterio de aceptabilidad de riesgo total debe depender de la población. El autor propone dos curvas para modelar el riesgo aceptable según el tamaño de la población, las que se muestran a continuación:

Ecuación 4-10 Curvas para modelar el riesgo aceptable según la población

$$1.\ R_L = 0{,}015\ P^{-0{,}5}$$
$$2.\ R_L = 0{,}28\ P^{-0{,}47}$$

Fuente: (Milvy, 1987)

Donde P es la población expuesta al riesgo y R_L es la tasa de riesgo de vida (individual).

La primera curva en Ecuación 4-10 es un promedio geométrico entre:

- $R_L = 10^{-6}$, que es una tasa de riesgo independiente a la población típicamente utilizada.
- $R_L = 236/P$, que establece un número constante de muertes (236) independiente de la población[87].

La segunda curva en la Ecuación 4-10 (que se muestra en la Figura 4-6) es el ajuste lineal de los riesgos de cancerígenos que están regulados o en vías de regulación. En este caso, cabe destacar que el valor de riesgo considerado corresponde al riesgo sin regulación, medido previamente a la implementación de cualquier normativa. En la Figura 4-6 se puede observar que la mayor parte de las exposiciones a cancerígenos sobre la primera curva están regulados o lo estarán (a la fecha de publicación del estudio), y 10 de 19 peligros de los que no se decidió legislar (triángulos) están bajo la primera curva. De este modo, la primera curva ($R_L = 0{,}015\ P^{-0{,}5}$) correspondería a un límite de riesgo aceptable.

[87] Por ejemplo, si la población es de 1.000 personas, el R_L es 236/1.000 = 0,236 y si es de 1.000.000 personas, el R_L es 236/1.000.000 = 0,000236.

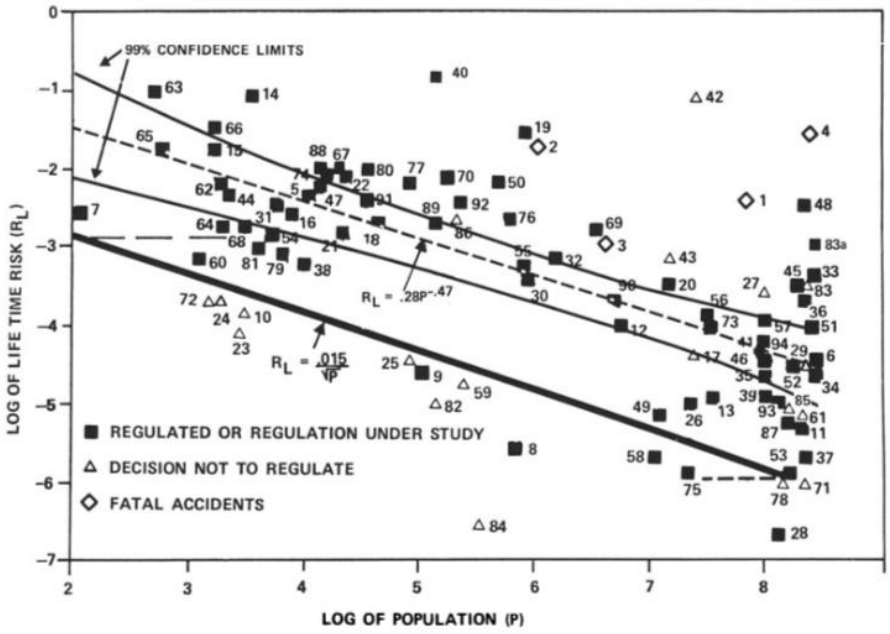


Figura 4-6 Riesgos individuales según el tamaño de la población en 90 circunstancias de exposición a 42 contaminantes

Nota 1: Los cuadrados negros representan cancerígenos que están regulados o en vías de regulación. Los triángulos representan las circunstancias de exposición que no se decidió regular. Los rombos representan los accidentes fatales, por ejemplo, en minería (punto 2).
Nota 2: La ecuación 1 y 2 (Ecuación 4-10) corresponden a la línea diagonal gruesa y punteada respectivamente.
Fuente: (Milvy, 1987)

Por otra parte, Whipple (1988) en el artículo "Riesgo aceptable" describe diferentes tópicos relevantes para comprender lo que significa un riesgo aceptable. Por ejemplo, define que las diferentes maneras de establecer los estándares de riesgo son:

1. Análisis Costo Beneficio: se basa en que para cualquier acción los beneficios tienen que ser mayores que los riesgos o costos. La ventaja de esta aproximación es que es económicamente eficiente, pero los niveles riesgo residuales pueden ser considerados no equitativos o aceptables.
2. Aproximaciones por nivel de riesgo: se basa en asegurar a que el riesgo individual sea aceptablemente bajo. Su ventaja es que se fomenta la innovación en control de riesgos. Su desventaja es que no se considera el balance marginal de costos y beneficios.
3. Aproximaciones basadas en tecnología: se ha utilizado para establecer los estándares de seguridad. Algunos ejemplos son mejores prácticas de ingeniería y mejores tecnologías de control disponibles. La ventaja de este método es que se ejerce un control efectivo del riesgo, pero la desventaja es que puede ser a muy alto costo.

En este artículo se define el **riesgo de "minimis"**, que es un riesgo muy pequeño (insignificante) y por lo tanto no está en la preocupación de los legisladores regularlo debido a que no sería costo oportuno. El autor menciona que el límite para que un riesgo sea considerado insignificante es bajo 10^{-6}-10^{-7} anual.

4.1.3.4 Australia – Environmental Health Risk Assessment: Guidelines for assessing human health risks from environmental hazards

En el año 2012 se publicó una actualización del documento "*Environmental Health Risk Assessment: Guidelines for assessing human health risks from environmental hazards*" (Environmental Health Standing Committee (enHealth), 2012) que pertenece al Comité Permanente de Salud Ambiental del Departamento de Salud de Australia. La actualización fue realizada por el Centro Australiano de la Evaluación de Riesgos de la Salud Humana (ACHHRA por sus siglas en inglés) en la Universidad de Monash. En este documento se señala que **en varias regulaciones australianas las autoridades han planteado un riesgo aceptable de 10^{-6},** pero puede depender de si el riesgo está asociado a la contaminación del aire, agua o alimentos o si está relacionado a la exposición de un solo contaminante o a múltiples. Finalmente, **en el documento se plantea que el riesgo aceptable debería ser de 10^{-5}** para la evaluación de riesgo que se enfoca en cancerígenos sin umbral en suelos contaminados, el cual proviene de la recomendación de la Agenda 4 de las Medidas de Protección Ambiental (National Environment Protection Council (NEPC), 2010).

4.1.3.5 Resumen comparativo de los riesgos aceptables identificados

En la Tabla 4-14 se muestra una recopilación con los valores de riesgo aceptable que se encontraron en la literatura internacional.

Tabla 4-14 Resumen de recopilación de riesgos aceptables

Clasificación	Nivel de riesgo	Aplicación	País	Fuente
Riesgo aceptable	QD < 1 ERI < 10^{-5}	Sustancias tóxicas y cancerígenas	Francia	(Institut national de l'environnement industriel et des risques, 2013)
Riesgo aceptable	10^{-6}	Sustancias cancerígenas	Países Bajos	(Tweede Kamer der Staten-Generaal, 1988)
Riesgo aceptable	10^{-6}	Para diferentes establecimientos		(Ministerie van Volkshuisvesting, 2004)
Riesgo aceptable*	$R_L = 0{,}015\ P^{-0,5}$	Sustancias cancerígenas	Estados Unidos	(Whipple, 1988)
Riesgo aceptable	10^{-5}	Sustancias cancerígenas	Australia	(Environmental Health Standing Committee (enHealth), 2012)

(*) No se explicita con el término "aceptable", pero se análoga de acuerdo con su descripción y uso.

Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente, en la Tabla 4-15 se muestra una recopilación con los valores de riesgo insignificante encontrados en la literatura internacional.

Tabla 4-15 Resumen de recopilación de riesgos insignificantes

Clasificación	Nivel de riesgo	Aplicación	País	Fuente
Riesgo insignificante	10^{-8}	Sustancias cancerígenas	Países Bajos	(Tweede Kamer der Staten-Generaal, 1988)
Riesgo insignificante	10^{-6}-10^{-7} anual	General	Estados Unidos	(Milvy, 1987)

Fuente: Elaboración propia

4.2 Reunión con el equipo técnico del SEA para definir qué criterios son replicables

En base a los resultados obtenidos en las Actividades 2.1 y 2.2 (Sección 4.1), se realizó una reunión con el equipo técnico del SEA para definir qué criterios son replicables en función a la construcción de los resultados esperados del objetivo específico 4 de la presente consultoría. Esta reunión se realizó el jueves 23 de diciembre de 2021 a las 10.00 horas, por medio de la plataforma Microsoft Teams. En la siguiente Tabla 4-16 se presentan los asistentes a la reunión.

Tabla 4-16 Asistentes reunión de definición de criterios recomendados a partir de estudios nacionales e internacionales de afectación a la salud

Nombre	Consultor / Contraparte SEA
Gino Olivares Castro	Contraparte SEA
Damary Fonseca Ayala	Contraparte SEA
Simón Sánchez Caro	Contraparte SEA
Sergio Sanhueza Triviño	Contraparte SEA
Viviana Cerda Gho	Consultor
Sofía Contardo Schmidt	Consultor
Daniela Madrazo Ortega	Consultor
María Jesús Melej	Consultor
Rocío Herrera	Consultor

Fuente: Elaboración propia

En dicha reunión se indicaron brevemente los enfoques de la revisión asociada al desarrollo de estas actividades, mientras que se profundizó en las observaciones asociadas al Informe de Avance 1. De modo que, en la siguiente reunión, asociada a la presentación del informe de avance 2, es en la que se profundizó sobre los antecedentes encontrados en el desarrollo de las actividades asociadas al objetivo específico 2 (ver Sección 2.2). En la siguiente tabla se presentan los asistentes a la reunión mencionada.

Tabla 4-17 Asistentes reunión de presentación del informe de avance 2

Nombre	Consultor / Contraparte SEA
Gino Olivares Castro	Contraparte SEA
Damary Fonseca Ayala	Contraparte SEA
Rodrigo Rosales Díaz	Contraparte SEA
Luis Abdón Cifuentes	Consultor
Viviana Cerda Gho	Consultor
Daniela Madrazo Ortega	Consultor
María Jesús Melej	Consultor
Rocío Herrera	Consultor

Fuente: Elaboración propia

4.3 Criterios para definir significancia del impacto según estudios de afectación a la salud

A partir de lo expuesto en las Secciones 4.1.1, 4.1.2 y 4.1.3 se pueden obtener los incrementos aceptables de concentración para los diferentes contaminantes revisados, considerando los valores recopilados en las revisiones realizadas, para evaluar qué criterio podría definirse a partir de esta revisión. En particular, los incrementos en concentración asociados se obtuvieron aplicando la Ecuación 4-9 (Sección 4.1.1.3), en su versión recíproca, como se presenta en la Ecuación 4-11.

Ecuación 4-11 Incremento en la concentración asociado a un riesgo relativo dado

$$\Delta C = \frac{\Delta RR}{\beta}$$

Fuente: Elaboración propia

Para aplicar la Ecuación 4-11 es necesario seleccionar un **coeficiente de riesgo unitario** y un **riesgo aceptable**. En el caso del primer término, para este análisis se eligieron los valores de coeficientes de riesgo más altos y actualizados registrados para cada contaminante y periodo, lo que corresponde a un beta relacionado a un solo efecto y una sola causa para cada contaminante y periodo. Estos valores se seleccionaron debido a que representan los más conservadores, al identificar los mayores impactos a la salud. Por ejemplo, en el caso del $MP_{2,5}$ anual se utilizó el coeficiente de riesgo unitario relacionado al efecto de Mortalidad de Largo Plazo, que es el beta más alto entre los relacionados a este contaminante. En el caso del riesgo aceptable, se eligieron como referencia los valores más altos encontrados en la literatura, 10^{-5} y 10^{-6}, para evaluar cuáles serían los valores máximos que se podrían obtener por medio de este método. En la Tabla 4-18 se observan los incrementos de concentración aceptables para cada contaminante y métrica. En esta tabla se presentan dos incrementos: ΔC_1 y ΔC_2. El primero corresponde a un incremento calculado con un riesgo aceptable de 10^{-5} y el segundo considerando un riesgo aceptable de 10^{-6}.

Los incrementos ΔC_1 y ΔC_2 que se muestran en la Tabla 4-18 son valores de concentraciones muy bajos[88]. Por ejemplo, los incrementos expuestos en la Tabla 4-18 son entre un 0,001% y un 0,007% de los valores de la normativa nacional de calidad del aire. Mientras que es evidente que, a mayor riesgo, el incremento aceptable es mayor, lo que se observa al comparar el ΔC_1 con el ΔC_2. El hecho de que, el incremento en la concentración dependa fuertemente del riesgo aceptable seleccionado hace que este criterio sea complejo de recomendar. Es decir, elegir un riesgo aceptable implica establecer un nivel máximo de riesgo a la salud al que estarían expuestas las personas. Asimismo, como la definición de este nivel de riesgo no está descrito en la normativa, es difícil y políticamente complejo que sea aplicable al contexto nacional. Adicionalmente, cabe destacar que estos niveles de incremento en la concentración son difíciles de modelar y medir en la práctica. Por este motivo, a juicio experto, no se recomienda el uso de los criterios obtenidos con este método.

Tabla 4-18 Incremento de concentración aceptable a partir de estudios de afectación a la salud

Fuente	Métrica	Contaminante	β	ΔC_1 ($\Delta RR = 10^{-5}$) [µg/m³]	ΔC_2 ($\Delta RR = 10^{-6}$) [µg/m³]
Guía AGIES	Anual	$MP_{2,5}$	0,00940	0,00106	0,00011
GreenLab, 2018	24 horas	$MP_{2,5}$	0,00131	0,00763	0,00076
WHO, 2021	Anual	MP_{10}	0,01133	0,00088	0,00009
WHO, 2021	24 horas	MP_{10}	0,00091	0,01104	0,00110
GreenLab, 2018	Máxima 8h	O_3	0,00450	0,00222	0,00022
Guía AGIES	24 horas	SO_2	0,01100	0,00091	0,00009
WHO, 2021	24 horas*	CO	0,00005	0,18353	0,01835

(*) La normativa del monóxido de carbono solo incluye la métrica horaria y promedio diario de ocho horas, por lo tanto, no coincide con la métrica expuesta, pero se presenta para tener una referencia del incremento aceptable del CO.

Fuente: Elaboración propia

[88] Si se comparan los incrementos de concentración aceptables con los propuestos para EE.UU. (Tabla 3-4) son entre un 0,02% a un 0,6% de estos valores.

5. Diagnóstico de evaluación en el marco del SEIA

En esta sección se presenta el resultado de la revisión de los últimos dos años de evaluación ambiental en las zonas geográficas que se han declarados saturadas a lo largo de Chile. De acuerdo con lo acordado con la contraparte técnica, el alcance definido para la revisión son los proyectos que hayan sido aprobados entre el 2019 y 2020 (dos años) en zonas saturadas, independiente de la fecha de presentación.

5.1 Identificación de las zonas declaradas saturadas a nivel nacional

En primer lugar, se identifican normas primarias de calidad ambiental (NPCA), en este caso con enfoque en calidad del aire. Las normas primarias de calidad del aire, como se indica en la Ley 19.300[89]: "*son aquellas que establecen los valores de las concentraciones y períodos, máximos o mínimos permisibles de elementos, compuestos, sustancias, derivados químicos o biológicos, energías, radiaciones, vibraciones, ruidos o combinación de ellos, cuya presencia o carencia en el ambiente pueda constituir un riesgo para la vida o la salud de la población*".

Las NPCA vigentes en Chile a la fecha se presentan en la siguiente Tabla 5-1. Por definición, estas normas tienen alcance nacional, y se definen para distintos periodos según cada contaminante. Se puede observar que para el CO y el O_3 solo se definen estándares para corto plazo, en métrica de horas, mientras que los otros contaminantes se regulan también en concentraciones anuales.

[89] Letra n) del Artículo 2, Ley Nº19.300

Tabla 5-1 Normas primarias de calidad del aire vigentes en Chile

ID normativa	Fecha de publicación	Contaminante	Periodo	Concentración límite [µg/m³N]
DS 136/2000 del MINSEGPRES	06-ene-01	Pb	Anual	0,5
DS 115/2002 del MINSEGPRES	10-sept-02	CO	1 hora	30.000,0
			8 horas	10.000,0
DS 114/2002 del MINSEGPRES	06-mar-03	NO_2	1 hora	400,0
			Anual	100,0
DS 112/2002 del MINSEGPRES	06-mar-03	O_3	8 horas	120,0
DS 12/2011 del MMA *	09-may-11	$MP_{2,5}$	24 horas	50,0
			Anual	20,0
DS 59/1998 MINSEGPRES y CONAMA	25-may-98	MP_{10}	24 horas	150,0
			Anual	50,0
DS 104/2018 del MMA	16-may-19	SO_2	1 hora	350,0
			24 horas	150,0
			Anual	60,0

(*) La unidad de medida de los valores límites de la NPCA del MP2,5 es microgramos de material particulado por metro cúbico (µg/m³) y no microgramos de material particulado por metro cúbico normal (µg/m³N), a diferencia de las otras normas indicadas.
Nota: La NPCA para MP10 indicada en el DS 59/1998 MINSEGPRES y CONAMA se encuentra vigente desde el 17 de octubre de 2015, fecha en la que se derogó el DS 20/2013 del MMA.

Fuente: Elaboración propia

Una vez identificados los contaminantes regulados por normas primarias de calidad del aire, se realizó una revisión de todas las zonas declaradas saturadas en el territorio nacional. Según lo indicado en la Ley 19.300, una zona saturada es aquella en que una o más normas de calidad ambiental se encuentran sobrepasadas. Una vez que se identifica la superación de una NPCA, por medio de un decreto supremo se declara el estado de saturación, indicando el o los contaminantes cuyas normas se han sobrepasado. En esta revisión se compilaron las declaraciones de saturación, latencia y declaraciones conjuntas, con el objetivo de asegurar la completitud de los antecedentes. Este procedimiento permitió identificar zonas en que han ocurrido cambios en el tipo de declaración, por ejemplo, de saturada a latente y viceversa, lo que a su vez permite verificar que no se estén considerando declaraciones que ya no se encuentren vigentes.

En la Tabla 5-2 se presenta el compilado de declaraciones de saturación vigentes en el territorio nacional. Destaca el hecho de que en 13 de las 16 regiones del país se ha declara alguna zona saturada, especialmente en el caso de la región metropolitana, declarada saturada en todas sus comunas. Es relevante destacar que las declaraciones de zonas saturadas se han debido a las concentraciones de MP —incluyendo $MP_{2,5}$ y MP_{10}—, SO_2, O_3 y CO. Mientras que no se han declarado zonas saturadas por NO_2 ni Pb.

Se aclara que, en la Tabla 5-2 se presentan todas las comunas con alguna declaración de saturación, sin embargo, como se observa en la columna de alcance de la declaración, en algunos casos se declaran saturadas comunas completas y en otros solo algunos sectores, por ejemplo, en el caso de las declaraciones asociadas a fundiciones. Esta diferenciación es relevante al momento de analizar los proyectos aprobados en zonas saturadas, ya que no es suficiente con

saber la comuna en la que se emplaza el proyecto para determinar si se encuentra saturada o no, si no que se debe ver caso a caso. En la Tabla 5-3 se presenta esta distinción, agrupando para cada región aquellas comunas declaradas saturadas en todo su territorio, y aquellas en que solo se trata de zonas dentro de la comuna, indicadas con saturación en “alguna zona”.

Cabe destacar que lo presentado en la Tabla 5-3 es lo que se utiliza para determinar los proyectos que han sido aprobados en el periodo de análisis, 2019 y 2020, por lo que en esta tabla no se presentan los resultados de las declaraciones de saturación publicadas durante el año 2021.

Tabla 5-2 Declaraciones de zonas saturadas vigentes en el territorio nacional

ID declaración	Fecha publicación	Contaminante saturado vigente	Alcance declaración	Región	Comunas con saturación
DS 181/1990 de Minería	16-ene-92	MP_{10}	Campamento de la División Chuquicamata de Codelco Chile; localidad de Chagres; y región Metropolitana de Santiago	Antofagasta	Calama
DS 1162/1993 del MINSAL	10-ago-93	MP_{10}	No explicita. Motivo declaración es monitoreo de Empresa SOQUIMICH S.A en campamentos de María Elena y Pedro de Valdivia	Antofagasta	María Elena
DS 255/1993 del MINSAGRI	18-dic-93	SO_2	Zona circundante a la Fundición Hernán Videla Lira	Atacama	Tierra Amarilla y Copiapó
DS 346/1994 del MINSAGRI	03-feb-94	MP_{10} y SO_2	Área circundante al Complejo Industrial Ventanas	Valparaíso	Puchuncaví, Quintero y Concón
DS 179/1994 del MINSEGPRES	16-nov-94	MP_{10} y SO_2	Zona circundante a la Fundición de Caletones, de la División El Teniente, de Codelco Chile	O'Higgins	Mostazal, Codegua, Machalí y Requínoa
DS 131/1996 del MINSEGPRES y la CONAMA	01-ago-96	MP_{10}, PTS, O_3 y CO	Región Metropolitana	Metropolitana	Todas las comunas de la región
DS 18/1997 del MINSEGPRES y la CONAMA	16-abr-97	MP_{10} y SO_2	Zona circundante a la Fundición de Potrerillos, de la División El Salvador de Codelco Chile	Atacama	Diego de Almagro
DS 35/2005 del MINSEGPRES	11-may-05	MP_{10}	Comunas Temuco y Padre Las Casas	La Araucanía	Temuco y Padre Las Casas
DS 50/2007 del MINSEGPRES	04-oct-07	MP_{10}	Zona circundante a la ciudad de Tocopilla	Antofagasta	Tocopilla
DS 74/2008 del MINSEGPRES	23-ago-08	MP_{10}	Zona circundante a la ciudad de Tocopilla	Antofagasta	Tocopilla
DS 07/2009 del MINSEGPRES	27-mar-09	MP_{10}	Valle Central de la región de O'Higgins	O'Higgins	Graneros, Rancagua, Doñihue, Olivar, Coltauco, Coínco, Quinta de Tilcoco, San Vicente de Tagua Tagua, Placilla, Mostazal, Codegua, Machalí, Malloa, Rengo, Requínoa, San Fernando y Chimbarongo
DS 08/2009 del MINSEGPRES	06-abr-09	MP_{10}	Localidad de Andacollo y sectores aledaños	Coquimbo	Andacollo

DS 57/2009 del MINSEGPRES	30-may-09	MP_{10}	Ciudad de Calama y su área circundante	Antofagasta	Calama
DS 12/2010 del MINSEGPRES	22-jun-10	MP_{10}	Comunas de Talca y Maule	Maule	Talca y Maule
DS 27/2012 del MMA	28-nov-12	$MP_{2,5}$ y MP_{10}	Comuna de Osorno	Los Lagos	Osorno
DS 33/2012 del MMA	28-nov-12	MP_{10}	Ciudad Coyhaique y zona circundante	Aysén	Lago Verde, Coyhaique
DS 36/2012 del MMA	25-mar-13	$MP_{2,5}$ y MP_{10}	Comunas de Chillán y Chillán Viejo	Ñuble	Chillán y Chillán Viejo
DS 02/2013 del MMA	06-may-13	$MP_{2,5}$	Comunas Temuco y Padre Las Casas	La Araucanía	Temuco y Padre Las Casas
DS 17/2014 del MMA	10-jun-14	$MP_{2,5}$ y MP_{10}	Comuna Valdivia	Los Ríos	Valdivia
DS 67/2014 del MMA	15-nov-14	$MP_{2,5}$	Región Metropolitana	Metropolitana	Todas las comunas de la región
DS 10/2015 del MMA	09-jun-15	$MP_{2,5}$	Comunas Concón, Quintero y Puchuncaví	Valparaíso	Concón, Quintero y Puchuncaví
DS 11/2015 del MMA	11-jun-15	$MP_{2,5}$ y MP_{10}	Comuna Los Ángeles	Biobío	Los Ángeles
DS 15/2015 del MMA	14-jul-15	$MP_{2,5}$	Comunas Lota, Coronel, San Pedro de la Paz, Hualqui, Chiguayante, Concepción, Penco, Tomé, Hualpén y Talcahuano	Biobío	Lota, Coronel, San Pedro de la Paz, Hualqui, Chiguayante, Concepción, Penco, Tomé, Hualpén y Talcahuano
DS 53/2015 del MMA	08-mar-16	$MP_{2,5}$	Valle central provincia Curicó	Maule	Teno, Curicó, Romeral, Molina, Rauco, Sagrada Familia
DS 15/2016 del MMA	30-ago-16	$MP_{2,5}$	Ciudad Coyhaique y zona circundante	Aysén	Lago Verde, Coyhaique
DS 42/2017 del MMA	30-may-18	$MP_{2,5}$	Valle Central de la región de O'Higgins	O'Higgins	Coínco, Coltauco, Doñihue, El Olivar, Quinta de Tilcoco, San Vicente de Tagua Tagua, Rancagua, Graneros, Placilla, Mostazal, Codegua, Requinoa, San Fernando, Malloa, Rengo, Chimbarongo y Machalí
DS 107/2018 del MMA	11-jun-19	MP_{10}	Provincia de Quillota y las comunas de Catemu, Panquehue y Llaillay de la provincia de San Felipe de Aconcagua	Valparaíso	Quillota, La Cruz, Calera, Nogales, Hijuelas, Catemu, Panquehue y Llaillay
DS 24/2020 del MMA	29-ene-21	$MP_{2,5}$	Comuna de San Pablo y la macrozona centro-norte de la región de Los Lagos	Los Lagos	San Pablo, Río Negro, Purranque, Puerto Octay, Frutillar, Llanquihue, Puerto Varas y Puerto Montt
DS 07/2021 del MMA	14-jul-21	$MP_{2,5}$	Valle Central de la Región del Maule	Maule	Teno, Romeral, Curicó, Molina, Río Claro, Rauco, Sagrada Familia, San Clemente, San Rafael, Hualañé
DS 15/2021 del MMA	18-oct-21	MP_{10}	Zona de Copiapó y Tierra Amarilla	Atacama	Tierra Amarilla y Copiapó

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5-3 Comunas con saturación completa o en alguna zona para algún contaminante regulado por NPCA, según región, en el periodo 2019-2020

Región	Alcance saturación	Comuna	Región	Alcance saturación	Comuna
Antofagasta	Alguna zona	Calama	**Maule**	Completa	Maule
		María Elena			Talca
		Tocopilla		Alguna zona	Curicó
Atacama	Alguna zona	Copiapó			Hualañé
		Diego de Almagro			Molina
		Tierra Amarilla			Rauco
Coquimbo	Alguna zona	Andacollo			Río Claro
Valparaíso	Completa	Concón			Romeral
		Puchuncaví			Sagrada Familia
		Quintero			San Clemente
		Catemu			San Rafael
		Hijuelas			Teno
		La Calera	**Ñuble**	Completa	Chillán
		La Cruz			Chillán Viejo
		Llaillay	**Biobío**	Completa	Chiguayante
		Nogales			Concepción
		Panquehue			Coronel
		Quillota			Hualpén
Metropolitana	Completa	Todas las comunas			Hualqui
O'Higgins	Completa	Coínco			Los Ángeles
		Coltauco			Lota
		Doñihue			Penco
		El Olivar			San Pedro de la Paz
		Graneros			Talcahuano
		Placilla			Tomé
		Quinta de Tilcoco	**La Araucanía**	Completa	Padre Las Casas
		Rancagua			Temuco
		San Vicente de Tagua Tagua	**Los Ríos**	Completa	Valdivia
	Alguna zona	Chimbarongo	**Los Lagos**	Completa	Osorno
		Codegua	**Aysén**	Completa	Coyhaique
		Machalí			Lago Verde
		Malloa	-	-	-
		Mostazal			
		Rengo			
		Requinoa			
		San Fernando			

Fuente: Elaboración propia

El detalle de estas declaraciones se encuentra disponible en el anexo digital, en el documento "EMZOSA-BD_Zonas_declaradas.xlsx".

5.2 Sistematización de la evaluación ambiental en las zonas saturadas, en los últimos dos años

Una vez identificadas las zonas declaradas saturadas por la superación de alguna NPCA, se sistematizaron los proyectos aprobados entre el 2019 y 2020 en dichas zonas. Las principales características de estos proyectos, así como enlaces a sus expedientes, se pueden descargar desde la página web del SEIA, en la sección de búsqueda de proyectos. Junto con lo anterior, también se incluyeron los antecedentes revisados por la contraparte técnica en algunos de estos proyectos, los que fueron entregados al inicio de la consultoría.

De este modo, los proyectos aprobados entre el 2019 y 2020 se sistematizaron en una única base de datos que incluye todas las regiones con alguna declaración de saturación (ver Tabla 5-3). En la Tabla 5-4 se resumen los estudios identificados.

Tabla 5-4 Total proyectos aprobados en 2019-2020 en el SEIA, según región

Región	DIA	EIA	Total proyectos
Antofagasta	80	3	**83**
Atacama	40	5	**45**
Coquimbo	33	1	**34**
Valparaíso	39	4	**43**
Metropolitana	207	5	**212**
O'Higgins	60	2	**62**
Maule	108		**108**
Ñuble	40		**40**
Biobío	72	2	**74**
La Araucanía	39	1	**40**
Los Ríos	9	2	**11**
Los Lagos	37	1	**38**
Aysén	8		**8**
Total proyectos	**772**	**26**	**798**

Fuente: Elaboración propia

Sin embargo, tal como se describió en la Sección 5.1, no todas las comunas tienen alguna zona saturada. Como los datos de proyectos aprobados incluyen las comunas en las que se emplazan, es posible diferenciar los que se encuentran en comunas sin declaraciones de saturación. El resultado de esta segmentación se presenta en la Tabla 5-5. Adicionalmente, en esta tabla se presentan los proyectos según si la comuna se encuentra declarada saturada de forma completa o solo en alguna zona, según la diferenciación de comunas presentada previamente en la Tabla 5-3.

Tabla 5-5 Proyectos aprobados en 2019-2020 en el SEIA que se emplazan en comunas con alguna zona saturada, según región

Región	DIA		EIA		Total proyectos
	Completa	Alguna zona	Completa	Alguna zona(*)	
Antofagasta		31		2	33
Atacama		27		4	31
Coquimbo		2			2
Valparaíso	11		1		12
Metropolitana	207		5		212
O'Higgins	17	19		1	37
Maule	18	37			55
Ñuble	23				23
Biobío	60		2		62
La Araucanía	11				11
Los Ríos	4		2		6
Los Lagos	4				4
Aysén	2				2
Total proyectos	**357**	**116**	**10**	**7**	**490**

Nomenclatura:
Completa: Comunas que se encuentran declaradas saturadas en toda su extensión.
Alguna zona: Comunas en las que alguna zona de esta se encuentra saturada, pero no la comuna completa. Proyectos emplazados en estas comunas pueden o no encontrarse en una zona saturada.
(*) De los EIA identificados en comunas con alguna zona saturada, solamente uno se emplaza en zona saturada, en la región de Antofagasta.

Fuente: Elaboración propia

5.3 Análisis de la evaluación ambiental en las zonas saturadas, en los últimos dos años

A continuación, se presenta el resultado de la revisión y análisis de los proyectos aprobados entre el 2019 y 2020 en zonas saturadas.

En la revisión realizada de los proyectos aprobados se priorizó revisar todos los EIA, mientras que de los DIA se revisó una parte de ellos, según lo acordado con la contraparte técnica. En particular, en el caso de los DIA solo se revisaron proyectos emplazados en territorios donde la totalidad de la comuna está declarada como zona saturada, y, por lo tanto, no se revisaron DIA localizadas en territorios donde solo una parte de la comuna está declarada saturada. Mientras que en el caso de los EIA se revisó caso a caso si se encontraban en zona saturada o no, para determinar si se revisaba en profundidad el proyecto o no. En total se revisaron 167 proyectos, incluyendo EIA y DIA, dentro de los cuales solo 45 modelaron el impacto en la calidad del aire de sus emisiones. Un resumen de estos se presenta en la Tabla 5-6, donde a su vez se indican los contaminantes saturados en cada caso.

Tabla 5-6 Proyectos revisados que modelaron su impacto en la calidad del aire, para algún contaminante

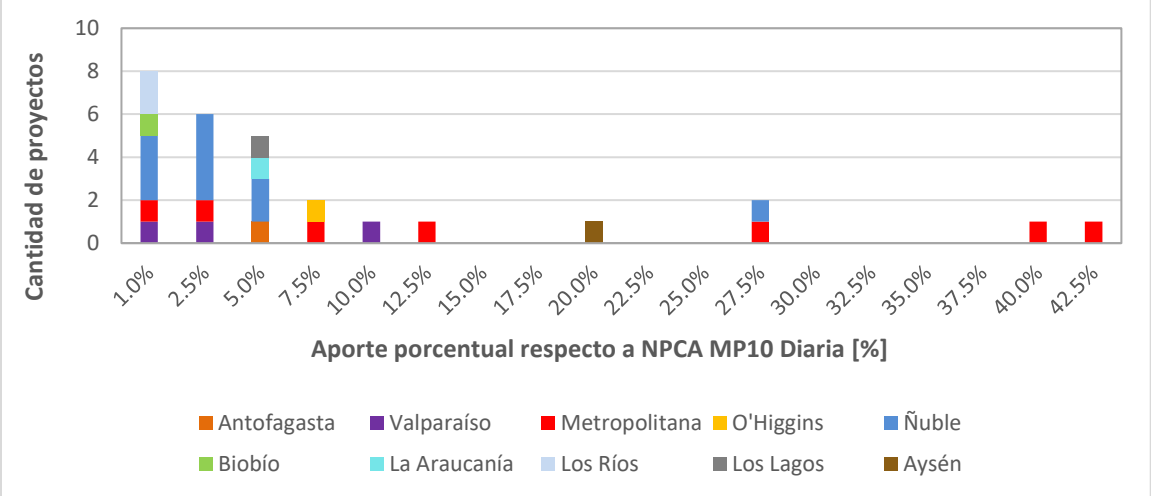
Región	Contaminantes saturados(*)	Contaminantes modelados	DIA	EIA	Total proyectos
Antofagasta	MP_{10}	MP_{10}, $MP_{2,5}$		1	**1**
Valparaíso	MP_{10}	MP_{10}, $MP_{2,5}$	1		**1**
		MP_{10}, $MP_{2,5}$, NO_2, SO_2, CO	2		**2**
	$MP_{2,5}$, SO_2	MP_{10}, $MP_{2,5}$, NO_2, SO_2, CO	2	1	**3**
		MP_{10}, $MP_{2,5}$, NO_2, SO_2, CO, O_3	1		**1**
Metropolitana	MP_{10}, $MP_{2,5}$, O_3, CO	MP_{10}, $MP_{2,5}$	2	1	**3**
		MP_{10}, $MP_{2,5}$, NO_2		1	**1**
		MP_{10}, $MP_{2,5}$, NO_2, SO_2, CO	1		**1**
		MP_{10}, $MP_{2,5}$, NO_2, SO_2, CO, O_3		2	**2**
O'Higgins	MP_{10}, $MP_{2,5}$	MP_{10}, $MP_{2,5}$, NO_2, SO_2, CO	1		**1**
Ñuble	MP_{10}, $MP_{2,5}$	MP_{10}	4		**4**
		MP_{10}, $MP_{2,5}$	5		**5**
		MP_{10}, $MP_{2,5}$, NO_2, SO_2, CO	1		**1**
Biobío	MP_{10}, $MP_{2,5}$	MP_{10}, $MP_{2,5}$, NO_2, SO_2, CO		1	**1**
	$MP_{2,5}$	MP_{10}	1		**1**
		MP_{10}, $MP_{2,5}$	5		**5**
		MP_{10}, $MP_{2,5}$, NO_2, CO	2		**2**
		MP_{10}, $MP_{2,5}$, NO_2, SO_2		1	**1**
		MP_{10}, $MP_{2,5}$, NO_2, SO_2, CO	3		**3**
		MP_{10}, $MP_{2,5}$, NO_2, SO_2, CO, O_3	1		**1**
La Araucanía	MP_{10}, $MP_{2,5}$	MP_{10}, $MP_{2,5}$	1		**1**
Los Ríos	MP_{10}, $MP_{2,5}$	MP_{10}, $MP_{2,5}$, NO_2		1	**1**
		MP_{10}, $MP_{2,5}$, NO_2, SO_2, CO		1	**1**
Los Lagos	MP_{10}, $MP_{2,5}$	MP_{10}, $MP_{2,5}$	1		**1**
Aysén	MP_{10}, $MP_{2,5}$	MP_{10}, $MP_{2,5}$	1		**1**
Total proyectos			**35**	**10**	**45**

Nota: Contaminantes saturados fueron analizados según las comunas o la zona geográfica específica en que se emplaza el proyecto.
Fuente: Elaboración propia

En las siguientes figuras se presentan los aportes respecto a la norma de cada proyecto, agrupados según si el contaminante está saturado o no. Es decir, para los proyectos en zona saturada por MP_{10} se presentan los cambios estimados en la concentración de MP_{10} y $MP_{2,5}$, diaria y anual, y así, recíprocamente, para los otros contaminantes. Específicamente, en la Figura 5-1, Figura 5-2, Figura 5-3 y Figura 5-4 se presentan los aportes porcentuales a las NPCA de MP_{10} diario, MP_{10} anual, $MP_{2,5}$ diario y $MP_{2,5}$ anual. En la mayoría de los proyectos la modelación del cambio en la calidad del aire solo se hacía para la etapa de construcción o para la de operación, por lo que en estas figuras se muestran ambos casos en conjunto; en los pocos casos en que se modelaba para ambas fases, se priorizó presentar la fase de construcción, en que los impactos estimados suelen ser mayores.

En el caso del MP_{10}, el aporte de los proyectos aprobados en zonas saturadas por MP_{10} alcanza hasta un 40,2% de la NPCA diaria, correspondiente a un EIA de la región Metropolitana. Los

proyectos que ingresan al SEIA mediante un EIA son los mayores aportantes a esta norma, encontrándose en un rango de 12% a 40,2%. En la Figura 5-1 se ven reflejadas las variaciones existentes en los aportes a la norma de los distintos proyectos analizados, los que en su mayoría se mantienen bajo el 5%[90].



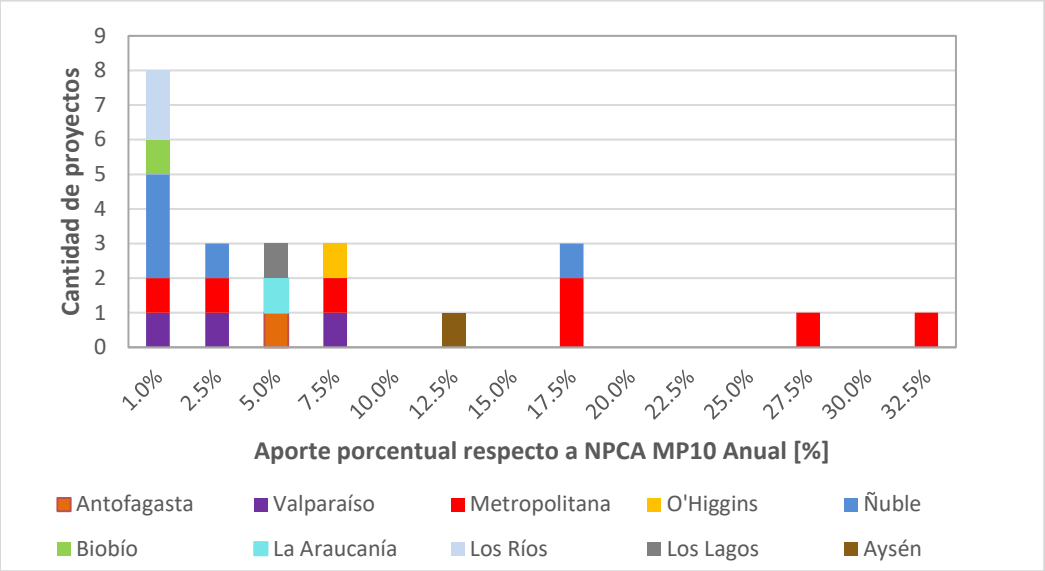
Nota: El primer valor del eje horizontal corresponde a 1%, lo que difiere de la escala utilizada en el resto de este eje.

Figura 5-1 Aporte porcentual de cada proyecto a las concentraciones de MP_{10} diario respecto a la NPCA

Fuente: Elaboración propia

Respecto a la NPCA anual para MP_{10}, los proyectos aprobados en zonas saturadas por MP_{10} aportan hasta un 31% de la norma, variando específicamente entre 15% y 31% en el caso los EIA. Los mayores aportes a la norma provienen de proyectos ubicados en la región Metropolitana, siguiéndole Ñuble y Aysén. En la Figura 5-2 se puede observar que alrededor de dos tercios de los proyectos aportan menos del 7,5% de la norma anual[91].

[90] Un total de 28 proyectos revisados modelaron el cambio en la concentración diaria de MP_{10}.
[91] Un total de 23 proyectos revisados modelaron el cambio en la concentración anual de MP_{10}.



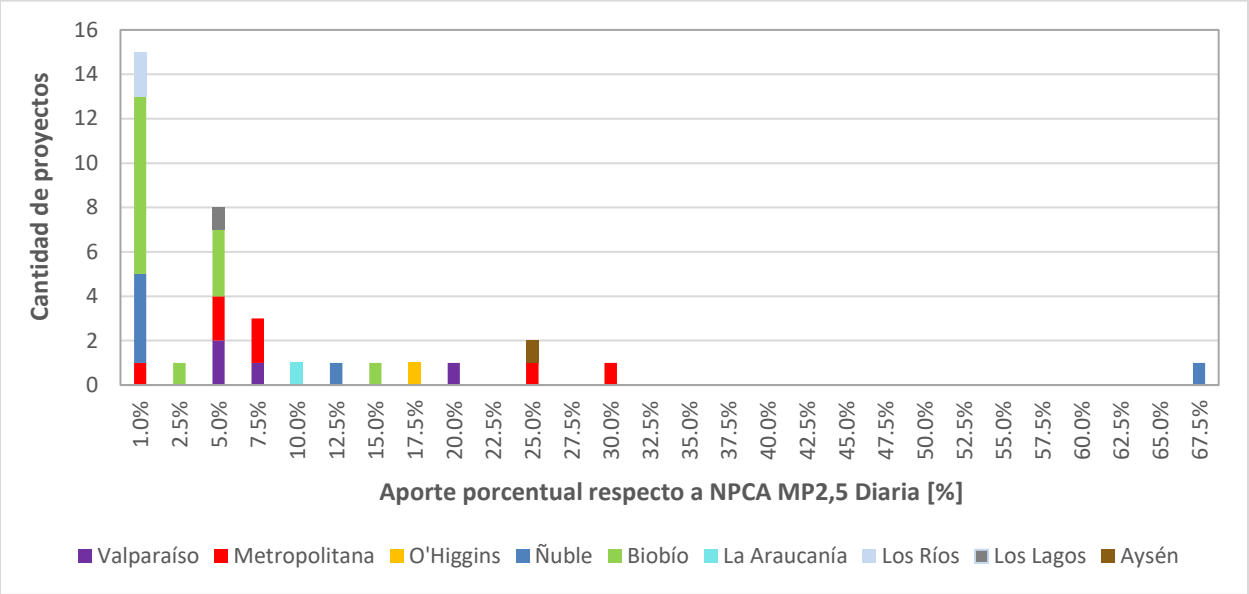
Nota: El primer valor del eje horizontal corresponde a 1%, lo que difiere de la escala utilizada en el resto de este eje.

Figura 5-2 Aporte porcentual de cada proyecto a las concentraciones de MP_{10} anual respecto a la NPCA

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, en el caso de $MP_{2,5}$, se presenta una cantidad mayor de proyectos respecto a lo anterior debido a que, si bien algunos no modelaron la concentración de $MP_{2,5}$ y sí lo realizaron para MP_{10}, se encontraron más proyectos en comunas saturadas por $MP_{2,5}$. El aporte máximo a la NPCA diaria de $MP_{2,5}$ entre los proyectos analizados es de 66%, lo que corresponde a un proyecto ubicado en la región de Ñuble[92]. De la Figura 5-3 es posible observar que la mayoría de los proyectos evaluados aportan menos de un 7,5% de la norma diaria, mientras que el resto se distribuyen entre 10% y 30%, sin considerar el proyecto anteriormente mencionado cuyo aporte es el mayor encontrado en este caso[93].

[92] Proyecto Optimización Planta Agroindustrial - Frutícola Olmué, en su fase de construcción (6 meses de duración).
[93] Un total de 36 proyectos revisados modelaron el cambio en la concentración diaria de $MP_{2,5}$.



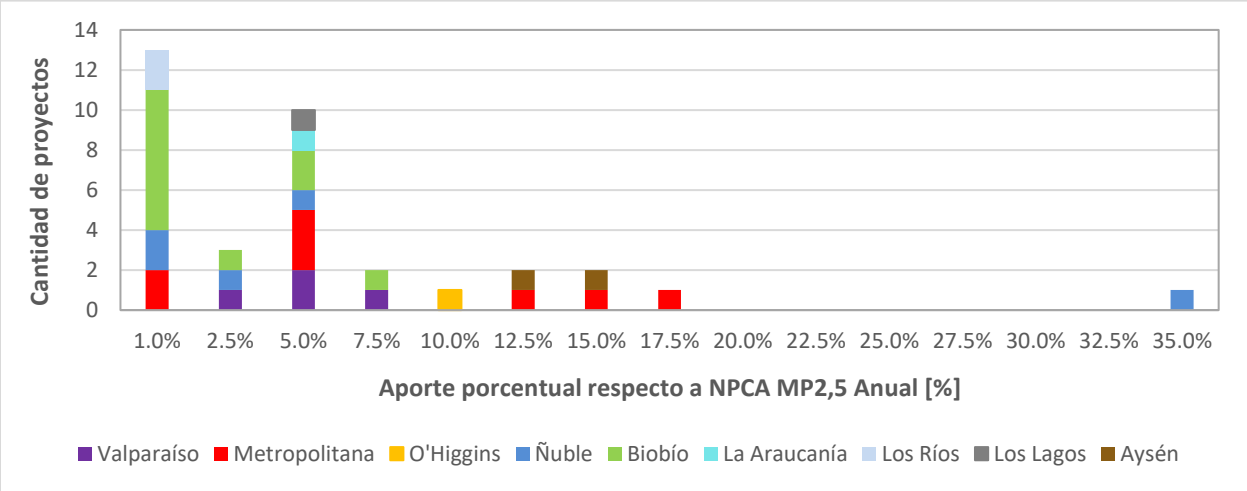
Nota: El primer valor del eje horizontal corresponde a 1%, lo que difiere de la escala utilizada en el resto de este eje.

Figura 5-3 Aporte porcentual de cada proyecto a las concentraciones de $MP_{2,5}$ diario respecto a la NPCA

Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente, en la Figura 5-4 se observan los aportes a la NPCA anual de $MP_{2,5}$, donde la mayoría de los proyectos generarían un aumento en la concentración menor a un 5%. En este caso, el máximo aporte está dado por el mismo proyecto que se mencionó para la norma diaria (ver Figura 5-3), y es de 33%. Los aportes de los EIA varían en un rango de 0,05% a 17%, encontrándose mayoritariamente bajo un 10%[94].

[94] Un total de 35 proyectos revisados modelaron el cambio en la concentración anual de $MP_{2,5}$.



Nota: El primer valor del eje horizontal corresponde a 1%, lo que difiere de la escala utilizada en el resto de este eje.

Figura 5-4 Aporte porcentual de cada proyecto a las concentraciones de $MP_{2,5}$ anual respecto a la NPCA

Fuente: Elaboración propia

Además de analizar la cantidad de proyectos que aportan cierto rango porcentual a las concentraciones respecto a las NPCA, resulta importante considerar la duración del impacto generado. Para esto, en las siguientes figuras se presentan los años de duración de las fases de construcción, operación o ambas modeladas, según sea el caso, asociadas al aporte porcentual sobre la norma diaria y anual de MP_{10} y $MP_{2,5}$. Se analizan los proyectos ubicados en comunas que se encuentran saturadas por el contaminante a analizar. Para los proyectos en los que la duración de la fase de operación tiene un plazo indefinido, para efectos de poder incorporarlos en los gráficos, su duración se reemplaza lo que se reemplaza por un valor de 79 años, muy superior a lo registrado en el resto. Lo anterior con el objetivo de poder compararlos con los otros proyectos de plazo definido.

La Figura 5-5 refleja la variabilidad entre las duraciones del aporte respecto a la NPCA diaria de cada proyecto ubicado en comunas con saturación por MP_{10}. Se puede observar que existen proyectos que destacan por su aporte notoriamente mayor, como es el caso del EIA cuya concentración de MP_{10} modelada aporta un 40,2% respecto a la norma diaria[95]. Las concentraciones de la modelación de calidad del aire presentadas son en el Punto de Máximo Impacto (PMI) y considera la emisión simultánea de todas las fuentes emisoras, a modo de analizar el peor escenario de modelación. Respecto a esto, en la realidad la emisión proviene por etapas, por lo que las concentraciones modeladas están probablemente sobreestimadas. Además, el proyecto es intensivo en generación de emisiones atmosféricas debido al alto nivel de excavaciones necesarias, superando el límite establecido para MP_{10} en el PPDA correspondiente, lo que implica que el titular debe realizar una compensación del 120%. Cabe destacar que las emisiones generadas y, por lo tanto, el aporte en la concentración del

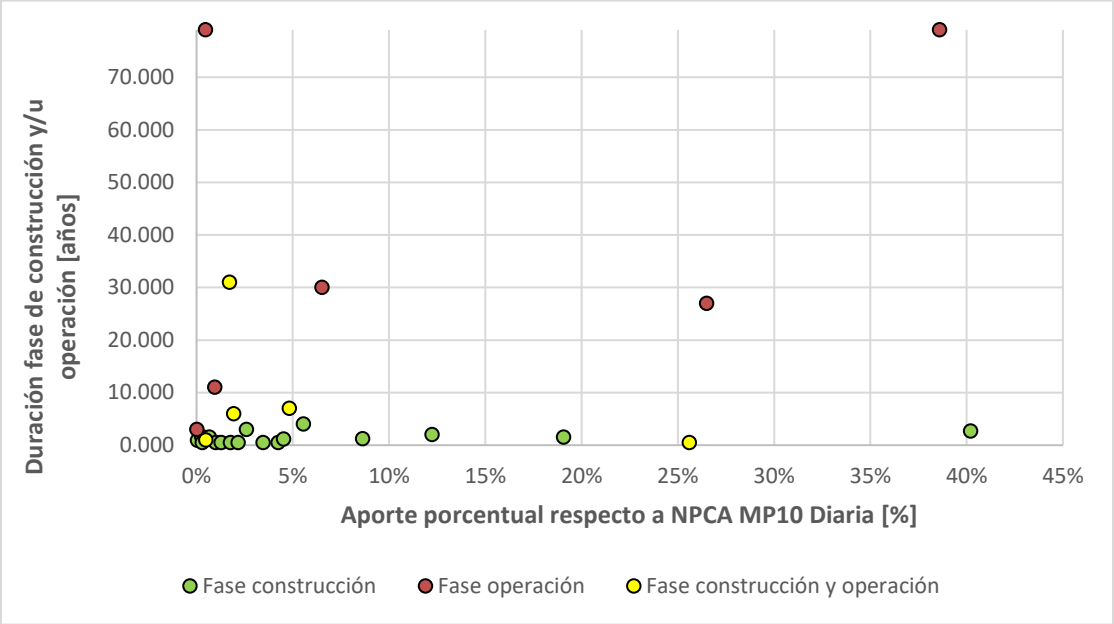
[95] Proyecto Tren Santiago Batuco, en su fase de construcción.

contaminante, son acotadas temporalmente respecto a la vida útil del proyecto, concentrándose exclusivamente en la fase de construcción, cuya duración es de 2,7 años.

Siguiendo con lo anterior, destaca en la Figura 5-5 otro EIA que aporta un 38,6% de MP_{10} respecto a la NPCA diaria[96]. Las concentraciones presentadas son durante el año 3 de la fase de operación, año de mayores emisiones, y proyectadas al año 2035. La concentración de MP_{10} es analizada en el receptor más cercano al proyecto, y su alto valor es debido a que la fase de operación contempla la circulación de vehículos a través de caminos pavimentados. Las emisiones generadas durante esta fase superan el límite establecido por el PPDA, sin embargo, estas corresponden a una reasignación de flujos vehiculares que actualmente y a futuro circularán por las vías. De todos modos, según lo indicado por el titular, estas serán compensadas según lo requerido por el plan. Es importante mencionar que la operación del proyecto tendrá una duración indefinida, por lo que resulta necesario tener especial consideración con el impacto generado en este tipo de proyectos, y en que estos cumplan correctamente con los planes de compensación.

También se puede notar en la Figura 5-5 otro EIA aportante de un 26,5% respecto a la norma[97]. En este caso no se considera fase de construcción, debido a que no se requiere obras adicionales a las actuales para operar. Las concentraciones presentadas corresponden al año 9 de la fase de operación, año de mayores emisiones y que superan los límites establecidos por el PPDA, por lo que requiere de compensación. Durante este año las emisiones se deben principalmente a la fase de extracción del proyecto, a la producción y selección de áridos y a la resuspensión de polvo en caminos no pavimentados, actividades que explican los altos aportes de MP_{10}. Como se puede observar en la Figura 5-5, la fase de operación tiene una duración de 27 años, lo que implica una larga duración del impacto. Ante esto, se espera que sus aportes en términos de calidad del aire sean compensados por la ejecución del plan de compensación de emisiones, por lo que se estima que el impacto no es significativo, según lo indicado por el titular. Adicionalmente, cabe aclarar que, si bien la modelación para este proyecto se realiza para distintos receptores, se presentan los resultados del receptor de mayores concentraciones, que se encuentra a 50 metros del proyecto.

[96] Proyecto ?Etapa 1 Modificación Nudo Quilicura: Túnel Lo Ruiz?, en su fase de operación.
[97] Proyecto Optimización Reservas Pozo San Bernardo y Nuevo Plan de Recuperación de Terreno, en su fase de operación.



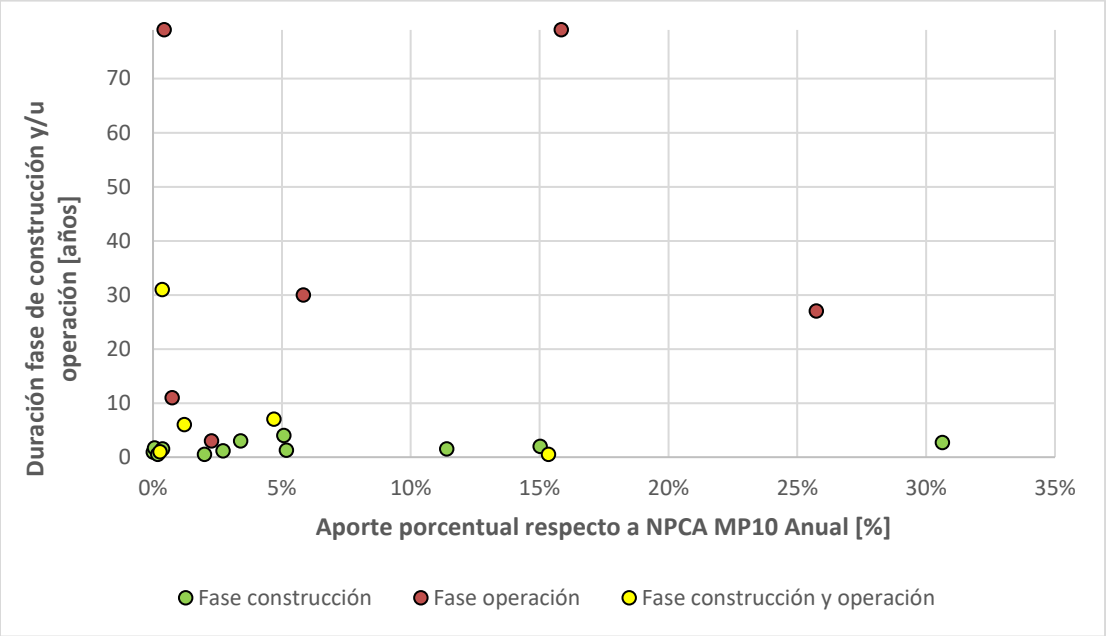
Nota: Para los proyectos cuya duración es **indefinida**, esta se grafica como una duración de 79 años, superior a la duración máxima de los otros proyectos, que permite de cierto modo contrastar visualmente estos proyectos con los de duración definida.

Figura 5-5 Duración fase construcción/operación en modelación del impacto en concentraciones diarias de MP_{10}

Fuente: Elaboración propia

De la misma forma, en la Figura 5-6 se muestran las duraciones asociadas al aporte porcentual sobre la norma anual de MP_{10}. El mayor aporte porcentual es de 31% y está dado por un EIA de la región Metropolitana, el mismo cuyo aporte fue máximo respecto a la norma diaria del mismo contaminante[98]. Siguiéndole se encuentra otro EIA aportante de un 25,7% respecto a la norma, el que fue mencionado anteriormente debido a su alto aporte a la norma diaria de MP_{10}[99]. Adicionalmente destaca un proyecto cuyo aporte de MP_{10} respecto a la norma anual es de 15,8%, el que también fue descrito para la norma diaria de este contaminante ya que fue el segundo mayor aportante respecto a esta, considerando las emisiones en su fase de operación[100].

[98] Proyecto Tren Santiago Batuco, en su fase de construcción.
[99] Proyecto Optimización Reservas Pozo San Bernardo y Nuevo Plan de Recuperación de Terreno, en su fase de operación.
[100] Proyecto ?Etapa 1 Modificación Nudo Quilicura: Túnel Lo Ruiz?, en su fase de operación.



Nota: Para los proyectos cuya duración es **indefinida**, esta se grafica como una duración de 79 años, superior a la duración máxima de los otros proyectos, que permite de cierto modo contrastar visualmente estos proyectos con los de duración definida.

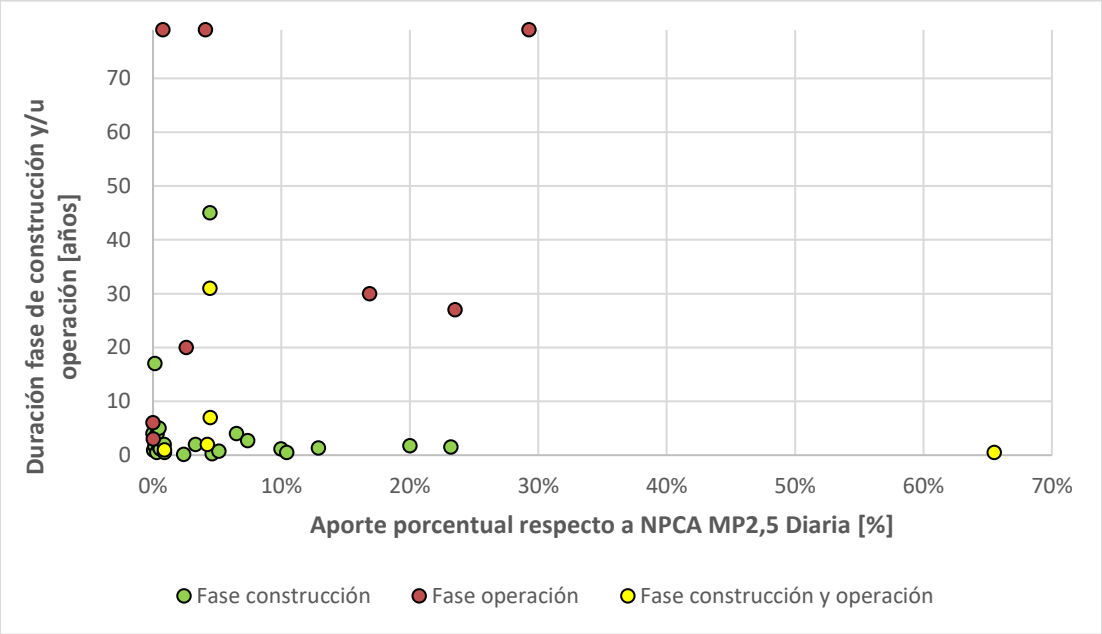
Figura 5-6 Duración fase construcción/operación en modelación del impacto en concentraciones anuales de MP_{10}

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, en la Figura 5-7 se muestra el caso de la relación entre la duración de los proyectos aprobados y su aporte porcentual respecto a la NPCA diaria de $MP_{2,5}$, por lo que se presentan todos los proyectos ubicados en comunas saturadas por este contaminante. El máximo aporte porcentual es de 66% y corresponde a un proyecto ubicado en la Región de Ñuble[101]. Las concentraciones aportantes por parte del proyecto se estimaron modelando el escenario más desfavorable en cuanto a generación de emisiones atmosféricas, que en este caso es la fase de construcción junto a la fase de operación actual. Estas emisiones son producto del movimiento de tierras y el tránsito de vehículos y, a pesar de que el total sobrepasa el límite permitido por el PPDA, tienen un carácter local y temporal, ya que contempla una duración de 6 meses. Además, las concentraciones presentadas corresponden al receptor humano más cercano, que se encuentra a 120 metros del proyecto.

En la Figura 5-7 también destaca un proyecto aportante del 23,5% respecto a la norma diaria de $MP_{2,5}$, cuya descripción se encuentra con anterioridad al mencionar los proyectos con altos aportes a la NPCA diaria de MP_{10}[102].

[101] Proyecto Optimización Planta Agroindustrial - Frutícola Olmué, en su fase de construcción y operación actual (6 meses de duración).
[102] Proyecto Optimización Reservas Pozo San Bernardo y Nuevo Plan de Recuperación de Terreno, en su fase de operación.



Nota: Para los proyectos cuya duración es **indefinida**, esta se grafica como una duración de 79 años, superior a la duración máxima de los otros proyectos, que permite de cierto modo contrastar visualmente estos proyectos con los de duración definida.

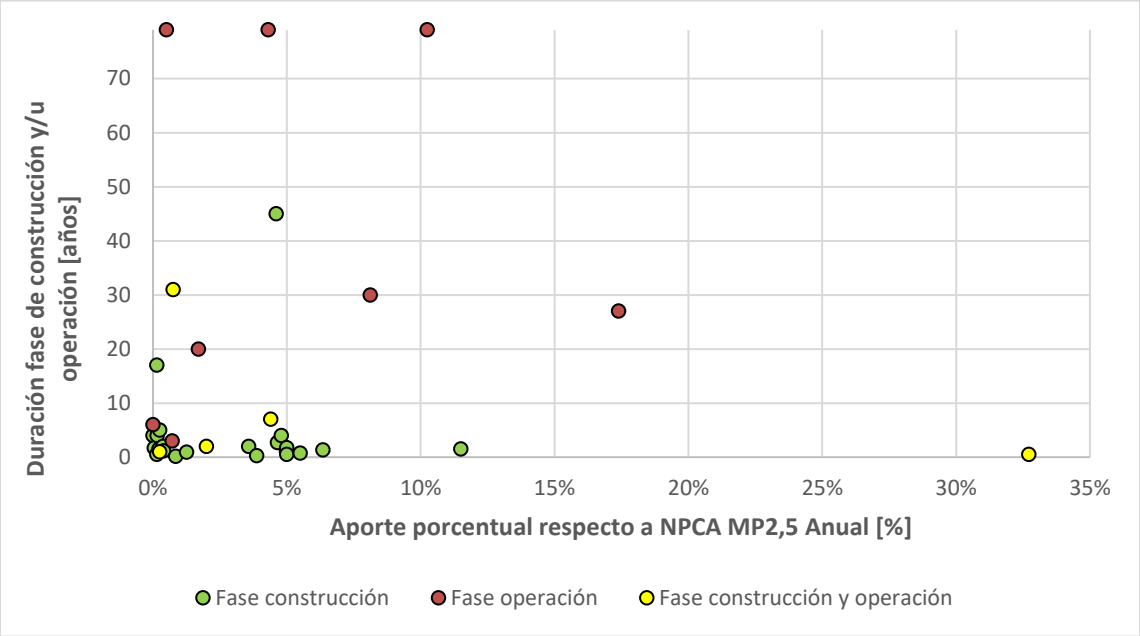
Figura 5-7 Duración fase construcción/operación en modelación del impacto en concentraciones diarias de $MP_{2,5}$

Fuente: Elaboración propia

La Figura 5-8 representa el aporte porcentual respecto a la NPCA anual de $MP_{2,5}$ comparado con la duración de los proyectos aprobados en zonas saturadas por $MP_{2,5}$. Se puede notar que existe un proyecto cuyo aporte porcentual a la norma es notoriamente mayor que el resto, siendo de 33% de la NPCA. Este proyecto fue descrito con anterioridad, ya que es también el máximo aportante a la norma diaria de $MP_{2,5}$[103], por lo que no resulta extraño que también lo sea para la norma anual. El segundo mayor aporte es de 17,4% y corresponde a un EIA perteneciente al sector de la minería y ubicado en la región Metropolitana, que también fue el segundo mayor aportante a la norma anual de MP_{10} [104].

[103] Proyecto Optimización Planta Agroindustrial - Frutícola Olmué, en su fase de construcción y operación actual (6 meses de duración).

[104] Proyecto Optimización Reservas Pozo San Bernardo y Nuevo Plan de Recuperación de Terreno, en su fase de operación.



Nota: Para los proyectos cuya duración es **indefinida**, esta se grafica como una duración de 79 años, superior a la duración máxima de los otros proyectos, que permite de cierto modo contrastar visualmente estos proyectos con los de duración definida.

Figura 5-8 Duración fase construcción/operación en modelación del impacto en concentraciones anuales de $MP_{2,5}$
Fuente: Elaboración propia

Se observa que, tanto para las concentraciones de MP_{10} y $MP_{2,5}$ como para las otras analizadas, se modela mayoritariamente la fase de construcción, debido a que generalmente corresponde al periodo de mayores emisiones en los proyectos. Sin embargo, también existen proyectos que modelan su fase de operación, los que pertenecen principalmente al sector energía, minería o inmobiliario. Los casos que modelan fase de construcción y operación de forma simultánea son pocos, ya que se realiza cuando en el cronograma del proyecto estas fases coinciden en un año y resulta ser el año de mayores emisiones, o cuando se pretende modelar el escenario más desfavorable, aunque estas fases no vayan a coincidir por cronograma.

Solo en algunos casos se aprobaron proyectos en zonas saturadas por otros contaminantes. Su aporte respecto a las respectivas NPCA se detallan a continuación:

- **SO_2:** Cuatro proyectos en la región de Valparaíso, con aportes de entre 0,01% y 3% de la norma diaria, y entre 0,02% y 0,7% de la norma anual.
- **CO:** Tres proyectos en la región Metropolitana, con aportes de entre 0,0001% y 0,5% de la norma de 1 hora, y entre 0,002% y 0,5% de la norma de 8 horas.
- **O_3:** Dos proyectos en la región Metropolitana, con aportes de entre 0,6% y 14% de la norma de 8 horas[105].

[105] Proyecto Optimización Reservas Pozo San Bernardo y Nuevo Plan de Recuperación de Terreno, en su fase de operación.

Particularmente, para la región Metropolitana se muestra el detalle del impacto en las concentraciones para los proyectos aprobados en esta, junto con el aporte porcentual respecto a las NPCA en el Anexo 6 (ver Sección 0).

Adicionalmente, existen distintos tipos de modelos de calidad del aire que pueden ser utilizados según los requerimientos y características del proyecto. Por esta razón, en el Anexo 7 (ver Sección 0) se presenta el detalle de los modelos atmosféricos utilizados por los proyectos que realizaron una modelación de su impacto en la calidad del aire, con el fin de evaluar si coinciden con las recomendaciones del SEA en este aspecto (SEA, 2012b).

El detalle de todos los proyectos revisados y todos los proyectos aprobados en el periodo 2019-2020 se encuentra disponible en el anexo digital, en el documento "EMZOSA-BD_Analisis_DIA_EIA.xlsx".

5.4 Criterios para definir significancia del impacto en proyectos aprobados en el SEIA en el periodo 2019-2020

Se hizo una revisión respecto a los criterios para definir si el impacto es o no significativo. Una síntesis de los criterios identificados unificados se presenta en la Tabla 5-7.

De los 167 proyectos revisados, solamente 4 indicaron que sus impactos sí eran significativos:

- Dos por emitir más de 1 ton/año de un contaminante.
- Uno por superar el límite de emisiones del PDA.
- Uno en que no fue posible identificar la justificación[106].

Si bien los dos primeros casos parecen diferentes, muchas veces el criterio de 1 ton/año provenía de los límites de emisiones definidos en el PDA o PPDA para exigir compensación, aunque no lo explicitaran así, por lo que el trasfondo de ambos criterios sería el mismo: lo requerido por el PDA o PPDA.

Por otro lado, en 162 proyectos revisados se indica que el impacto no es significativo. Como se observa en la Tabla 5-7, en 60 de estos proyectos se indica que el impacto no es significativo debido a que se realizará una compensación de las emisiones, aun considerando que esta compensación se realiza porque las emisiones superan lo exigido por el PDA o PPDA. En 50 de estos proyectos el principal motivo de que no se considere significativo el impacto es que se cumple la exigencia de emisión del PPDA o PDA. Otro de los principales criterios cuantitativos para esta definición, utilizado por 18 proyectos, es que las emisiones no superan cierto valor límite, desde 0,1 ton/año hasta 30 ton/año, dependiendo del contaminante. Como se indicó previamente, este tipo de criterios suele guardar relación con los límites de emisiones de los PDA o PPDA desde los cuales se exige una compensación. También se identificaron 14 proyectos en

[106] Se referenciaba un anexo no disponible en la página del SEIA.

que el criterio de significancia utilizado guarda relación con la NPCA respectiva, ya sea respecto a su superación o a alcanzar la latencia a relación a ella, o como valores porcentuales de aporte respecto al valor de la norma. Estos varían desde 0,4% hasta 10%, dependiendo del contaminante, sin embargo, no se justifica en ningún caso la definición de este límite en particular, y muchas veces el número indicado solamente corresponde al máximo alcanzado según la modelación del impacto en la calidad del aire del proyecto. Del mismo modo, se identifica un proyecto que define que su impacto no es significativo por implicar un cambio menor a 0,5 µg/m^3, valor que no se justifica con argumentos ni referencias.

En cuanto a criterios cualitativos utilizados para definir como no significativo el impacto, en 10 proyectos el principal criterio utilizado guarda relación con que las emisiones se consideraron temporales, acotadas y de impacto local limitado. En algunos casos se entregan argumentos en relación con esto para justificar la calificación de no significativo, por ejemplo, que las emisiones son solo en la fase de construcción o esporádicamente por acceso de vehículos para mantenciones, sin embargo, dichos argumentos siempre se plantean en forma cualitativa, sin dar luces de criterios específicos concretos. Se destaca que este tipo de criterios cualitativos son los únicos que consideraban en su evaluación la duración del impacto.

De este modo, en la mayoría de los casos el criterio es que se cumple el mínimo exigido por los instrumentos regulatorios, porque se compensa cuando se supera el límite de emisión exigido en los PDA o PPDA, o por criterios cualitativos según la duración y alcance del impacto.

Tabla 5-7 Criterio para evaluar la significancia del impacto del proyecto

Tipo de criterio	Criterio de significancia unificado	Total proyectos
Cuantitativo	Compensación	60
	Cumple límite PPDA	48
	Cumple límite PPDA y cambio concentraciones bajo 2,5% NPCA	1
	Cumple límite PPDA y emisiones temporales	1
	Emisiones MP/MP_{10} menores a 1 ton/año	14
	Emisiones MP/MP_{10} menores a 0,1 ton/año	1
	Emisiones MP_{10} menores a 5 ton/año y NOx < 15 ton/año	1
	Emisiones MP_{10} menores a 5 ton/año y NOx < 15 ton/año y SOx < 30 ton/año	2
	No superación NPCA ni latencia en receptores cercanos	8
	Cambio concentración bajo 0,4% NPCA	1
	Cambio concentración bajo 1% NPCA	1
	Cambio concentración bajo 4,2% NPCA y cumple límites anteproyecto PDA	1
	Cambio concentración MP_{10}, $MP_{2,5}$ y MP menor a 10%, y criterio de duración no especificado	1
	Cambio concentración MP_{10} bajo 3% NPCA y MP bajo 10% NPCA	1
	Cambio concentración MP_{10} bajo 5% NPCA y MP bajo 10% NPCA	1
	Cambio concentración MP_{10} y MP bajo 10% NPCA	1
	Cambio concentración menor a 0,5 µg/m^3	1
	Distancia al receptor	1
Cualitativo	Emisiones temporales, acotadas y de impacto local limitado	9
	Emisiones temporales, acotadas y de impacto local limitado, y cambio concentración menor a 0%	1
Sin información suficiente	Criterio no es claro	10
	Sin información	2
Total proyectos		**167**

Fuente: Elaboración propia

Los criterios identificados en esta revisión no presentan un trasfondo y/o justificación fundamentada, y que en la gran mayoría de los casos se limita al cumplimiento del mínimo exigido o a la compensación de acuerdo con lo exigido en los PDA o PPDA. Por esta razón no se identifican criterios replicables a partir de esta revisión.

6. Aplicación en el marco del SEIA

En la esta sección se presenta la propuesta de criterios de evaluación de la significancia del impacto de los contaminantes atmosféricos normados en zonas saturadas, así como otras recomendaciones para ser incorporadas en la evaluación realizada en el marco del SEIA.

6.1 Propuesta de listado de criterios a ser analizados y consensuados con el equipo técnico del SEA

A partir de los antecedentes recopilados, se elaboró una propuesta de criterios que fue enviada en un resumen ejecutivo y luego presentada al equipo técnico del SEIA. En dicha presentación se destacaron los hitos que definen la evaluación ambiental de un proyecto, se sintetizaron los criterios posibles identificados, y finalmente se planteó la propuesta de criterios recomendados. Los principales antecedentes de dicha reunión se presentan en el Anexo 8, en la Sección 0.

Según lo acordado con la contraparte técnica en dicha reunión, se desarrollaron en mayor profundidad los criterios seleccionados para la recomendación y la explicación sobre la elección de estos y no otros revisados en reuniones anteriores. Los criterios seleccionados corresponden a los SILs que son los valores límite por contaminante-periodo definidos por la USEPA. A continuación, se detalla la metodología desarrollada por la USEPA para su estimación, y se presentan los resultados obtenidos al replicar esta metodología al caso chileno. Finalmente se presenta la recomendación definitiva, obtenida como resultado del desarrollo de todas las actividades de esta consultoría.

A modo de recuerdo, como se presentó en la Sección 3.1.1, los SILs corresponden a concentraciones definidas de contaminantes criterio en el aire ambiental que se consideran intrascendentes, es decir, no significativas, en comparación con los NAAQS (USEPA, 2018a). **Los SILs se utilizan como herramienta de demostración de cumplimiento para garantizar un equilibrio entre el mantenimiento de la calidad del aire y la optimización de permisos ambientales.** Es importante aclarar que estos valores se utilizan en zonas no saturadas y no aplican en zonas saturadas debido a que en EE.UU., la calidad del aire no puede deteriorarse más allá de la concentración permitida por los NAAQS aplicables (USEPA, n.d.-i). Sin embargo, se profundizará en estos, ya que los SILs se fundamentan principalmente en la variabilidad intrínseca de los registros de calidad del aire, asociada a las emisiones y meteorología propia de cada lugar, de modo que los SILs representan un incremento que se “confunde” en la variabilidad propia de este registro. Asimismo, este incremento no se relaciona directamente a niveles de riesgos a la salud, sino que a un análisis estadístico. Por estas razones, los SILs se pueden evaluar tanto para una zona saturada y no saturada.

En el año 2018, la USEPA publicó *“Technical Basis for the EPA's Development of the Significant Impact Thresholds for PM2.5 and Ozone”* (USEPA, 2018c). En este documento se describe la metodología para obtener los SILs de tres estándares de calidad del aire de EE.UU. ($MP_{2,5}$ anual,

$MP_{2,5}$ en 24 horas y O_3 promedio diario máximo de 8 horas). La metodología para la obtención de los SILs consiste en un enfoque de **variabilidad de la calidad del aire** (*air quality variability approach*), la cual se basa en que los datos ambientales observados tienen una variabilidad propia, que se debe por una parte a la variabilidad intrínseca de las emisiones y por otra parte a la meteorología que controla el transporte y la formación de contaminantes.

En particular, se analiza la variabilidad del **Valor de Cumplimiento (VC)** (o *Design Value* en inglés) que es la medida estadística o el resumen de los datos monitoreados en los años más recientes (uno a tres años), en otras palabras, es el estadístico que se utiliza para describir la calidad del aire en un área. Por ejemplo, el VC del $MP_{2,5}$ diario es el percentil 98 de los promedios diarios de concentración en un año, según su NPCA.

6.2 Descripción de la metodología general de la USEPA para el cálculo de SILs

De manera general y para una mejor compresión, a continuación, se detalla la metodología de evaluación de SILs propuesta por la USEPA, diferenciando tres etapas: verificación y preparación de la base de datos de calidad del aire; implementación de *bootstrapping* para valores diarios de $MP_{2,5}$ y ozono; y finalmente el cálculo de los SILs.

6.2.1 Base de datos de calidad del aire

La base de datos utilizada para el cálculo de los SILs consiste en la agregación de los datos de calidad del aire de las diferentes estaciones de monitoreo siguiendo los procedimientos establecidos en los documentos "*40 CFR Appendix N to part 50 – Interpretation of the National Ambient Air Quality Standards for PM2.5*" (US-EPA, 2021) y "*40 CFR Appendix U to Part 50 - Interpretation of the Primary and Secondary National Ambient Air Quality Standards for Ozone*" (US-EPA, 2016). Estos documentos describen los requisitos de completitud que deben cumplir los monitores y las bases de datos de concentración de $MP_{2,5}$ y ozono, respectivamente, para ser representativos y comparables con la NAAQS (ver Sección 6.3 para mayores detalles).

Adicionalmente, luego de chequear la completitud de los datos, se debe revisar si entre los datos que se utilizarán para el análisis de variabilidad existen **datos vacíos o faltantes**, ya que estos se deben eliminar debido a que pueden producir errores en el cálculo de los SILs, en la aplicación del método de *bootstrapping*.

6.2.2 *Bootstrapping*

Para evaluar la variabilidad intrínseca de los datos de calidad del aire se utiliza el método de ***bootstrapping***, el cual permite cuantificar la incertidumbre de los estadísticos de una muestra para una población. En el método definido por la USEPA se realiza un **re-muestreo no**

parametrizado, aleatorio y con reemplazo, es decir, a partir de la muestra original de datos de calidad del aire se obtiene una nueva muestra que tiene la misma cantidad de valores que la muestra original, pero estos pueden ser distintos debido a que se pueden reemplazar y repetir los datos respecto al original. Más detalladamente, este re-muestreo cumple con las siguientes características:

- **No parametrizado:** significa que no se utiliza un parámetro estadístico, como el promedio aritmético, para obtener la nueva muestra.
- **Aleatorio:** la nueva muestra no se obtiene a partir de un patrón definido de elección de los datos originales, es decir, es al azar.
- **Con reemplazo:** se permite la repetición de los datos originales en la nueva muestra.

La muestra original para este caso son los datos horarios o diarios de calidad del aire por año. En general, el re-muestreo se realiza para cada trimestre[107] del año por separado[108], con el objetivo de mantener la estacionalidad de los datos. Luego de realizar el re-muestro, se calcula el VC adecuado según el tipo de contaminante y el periodo analizado, de acuerdo con los requerimientos descritos en cada norma respectiva. Este proceso se realiza 20.000 veces para los datos de cada año y por lo tanto se obtiene un vector de 20.000 valores de cumplimiento por año. El vector final de VC que se analiza para el cálculo de los SILs es el promedio de los vectores de tres años consecutivos. Por ejemplo, si se requiere calcular el SIL correspondiente a los años 2015-2016-2017, entonces se obtienen los tres vectores, cada uno correspondientes a cada año. Luego se obtienen 20.000 promedios trianuales, de modo que se obtiene un vector con los 20.000 valores promediados para el periodo, el cual corresponde al vector final.

6.2.3 Factores relevantes en la elección de un SIL

Para el cálculo de los SILs, la USEPA define cuatro factores que son importantes tener en consideración:

a) Elección de un **intervalo de confianza (IC)**: la USEPA establece que un cambio no significativo debe ser menor al IC de 68%, lo cual corresponde a una desviación estándar de distancia desde la media, lo que la estadística establece que es no significativo. Por esta razón, escoge un **nivel de 50%** como límite no significativo para la variabilidad de la calidad del aire, es decir, para el cálculo de la variabilidad de la calidad del aire se considera la diferencia entre los valores de los percentiles 25 y 75 del vector de VC obtenido del *bootstrapping*.

b) **Ajuste a los niveles** de los estándares de calidad del aire (NAAQs): para caracterizar la variabilidad se tienen dos tipos de escalas: **absoluta [µg/m^3 o ppb]** o **relativa (porcentual)**.

[107] Un trimestre corresponde a un periodo de tres meses. En esta consultoría el año se dividió de la siguiente manera: enero-febrero-marzo, abril-mayo-junio, julio-agosto-septiembre y octubre-noviembre-diciembre.
[108] El único caso en el que no se realiza el re-muestreo por trimestre es el O_3. El re-muestreo se realiza considerando toda la muestra original sin división debido a que, generalmente, solo se considera la "época de ozono", que es época en la que se tiene que monitorear este contaminante, la cual está determinada para cada estado en EE.UU.

La escala absoluta corresponde a utilizar la diferencia absoluta entre los valores extremos del IC. En cambio, la escala relativa es considerar la misma diferencia de la escala absoluta, pero dividida por un valor de VC base. Para el desarrollo de los SILs, la USEPA escogió una escala relativa considerando como valor base el VC actual (VC_o) que corresponde a el VC obtenido del set de datos original.

c) Selección de **escala geográfica**: para calcular los SILs se utilizó la **variabilidad media** del IC 50% de toda la red de monitoreo de EE.UU.

d) Selección de **escala temporal**: los SILs deben reflejar el estado más representativo de la atmósfera. La USEPA establece que **un periodo son 3 años**. Para el cálculo de los SILs se seleccionaron los **tres periodos de VC más recientes** (por ejemplo: 2012-2014, 2013-2015 y 2014-2016).

6.2.4 Cálculo SILs

El porcentaje de variabilidad relativa, en otras palabras, el valor del SIL en porcentaje, se calcula como la mitad de la diferencia entre el extremo superior e inferior del IC 50%, que corresponden al valor del percentil 25 y 75 respectivamente, del vector de VC dividido por el VC_o, donde este último término es el VC calculado con los valores originales de concentraciones del contaminante[109], obtenidas del SINCA. Luego, para obtener el valor en µg/m^3 y en ppb se multiplica el SIL [%] por el valor límite de la norma primaria de calidad del aire para ese VC. Esto se detalla en la Ecuación 6-1 y la Ecuación 6-2[110].

Ecuación 6-1 Cálculo del SIL [%]

$$SIL\ [\%] = \frac{VC_{P75} - VC_{P25}}{100 * 2 * VC_o}$$

Fuente: Elaboración propia a partir de (USEPA, 2018c)

Ecuación 6-2 Cálculo del SIL [µg/m^3 o ppb]

$$SIL\ \left[\frac{\mu g}{m^3}\ o\ ppb\right] = SIL\ [\%] * NPCA$$

Fuente: Elaboración propia a partir de (USEPA, 2018c)

Donde VC_{P75} y VC_{P25} es el percentil 75 y 25 del vector de VC, respectivamente.

[109] Es decir, VC_o corresponde a el valor de cumplimiento obtenido de datos reales de las estaciones de monitoreo, por ejemplo, para cada periodo trianual de monitoreo en el caso de la norma anual de $MP_{2,5}$.
[110] Las ecuaciones se obtuvieron directamente a partir de la descripción de la metodología del documento *"Technical Basis for the EPA's Development of the Significant Impact Thresholds for PM2.5 and Ozone"* (USEPA, 2018c).

6.3 Metodología del cálculo del SIL de $MP_{2,5}$ anual y diario y O_3

La USEPA utiliza la metodología general descrita en la Sección 6.2 para obtener los SIL relacionados a los VC de los contaminantes $MP_{2,5}$ y O_3. En particular, los VC de estos contaminantes son:

- **VC de $MP_{2,5}$ anual:** es el promedio anual de los promedios diarios de concentración de $MP_{2,5}$. El promedio anual se obtiene promediando los valores de concentración diarios por trimestre y luego para obtener el promedio anual se promedian los valores de cada trimestre.
- **VC de $MP_{2,5}$ diario:** es el percentil 98 de los promedios diarios de $MP_{2,5}$ en un año.
- **VC de O_3:** es el cuarto mayor valor anual de los máximos promedios diarios de 8 horas en el año.

Se debe tener en cuenta que, para todos los casos indicados, el VC final es el promedio de los VC de tres años consecutivos.

En la Sección 6.2.1 se mencionó que los datos de calidad del aire deben cumplir ciertos criterios de completitud para ser válidos. Estos criterios se describen en las secciones 6.3.1, 6.3.2, 6.3.3 y 6.3.4.

6.3.1 Validación de promedio diario de $MP_{2,5}$

El promedio diario de $MP_{2,5}$ se utiliza para calcular tanto el VC de $MP_{2,5}$ diario como el anual. El registro del promedio diario de $MP_{2,5}$ en una estación de monitoreo se considera válido si el promedio se obtiene a partir de un **75% de los promedios horarios de un día** (día de 24 horas), por ejemplo, el promedio de 18 horas. En el caso que existan menos de 24 horas del registro de concentraciones horarias en un día, pero igual o mayor que 18 horas entonces el promedio se obtiene dividiendo por la cantidad total de horas que hay disponibles. En el caso que existan menos de 17 horas disponibles en el registro, si el promedio diario de los valores horarios, al reemplazar los valores faltantes por cero, sobrepasa el límite de la norma diaria entonces sí se deben considerar esos datos; en el caso contrario, no se deben considerar.

6.3.2 Requisito de completitud para el cálculo del VC del $MP_{2,5}$ anual

Para obtener el **VC de $MP_{2,5}$ anual** se requieren de tres años de promedios anuales válidos. Un año se considera válido cuando se tiene **el 75% de datos diarios por trimestre** en el registro de una estación de monitoreo. Sin embargo, si se tiene por lo menos 11 datos (muestras) de promedios diarios válidos por trimestre y el promedio anual de las concentraciones resulta ser mayor a la norma anual, entonces estos datos deben ser igualmente considerados. Por último, si

se tiene trimestres con menos de 11 muestras, la USEPA establece que se debe hacer un test de sustitución de datos[111].

6.3.3 Requisito de completitud para el cálculo del VC $MP_{2,5}$ diario

Se requieren de tres años con valores anuales del **percentil 98 válidos de $MP_{2,5}$** para obtener el **VC de $MP_{2,5}$ diario**. Para considerar que un año es válido en EE.UU. se utiliza el mismo criterio que para el $MP_{2,5}$ anual. En el caso de que no se cumpla esta condición, la base de datos se debe considerar igual si existe por lo menos un trimestre válido y el percentil 98 anual de ese registro sobrepasa la norma diaria. Por último, si ninguno de los criterios anteriores se cumple, se debe realizar un test de sustitución de datos.

6.3.4 Requisito de completitud para el cálculo del VC ozono

Los datos de **ozono (O_3)** consisten en datos horarios. La base de datos utilizada para el análisis de O_3 consiste en las concentraciones **promedio de 8 horas** de ozono. Todos los datos válidos de una estación de monitoreo son incluidos en el cálculo del VC no solo el de la "época de ozono"[112].

Para que el cálculo del **promedio de 8 horas de ozono** sea considerado válido, el promedio debe considerar por lo menos seis concentraciones horarias de ozono y se calcula en base a las horas disponibles, es decir, si existen seis horas disponibles entonces el divisor del promedio es seis. Si existen cinco o menos concentraciones horarias disponibles para el cálculo del promedio, se debe calcular el promedio reemplazando los datos faltantes con cero, y si se sobrepasa el límite de la norma entonces sí se debe considerar ese valor promedio de 8 horas como válido.

El **máximo del promedio de 8 horas** para un día es el valor máximo de 17 promedios consecutivos de 8 horas comenzando con el periodo de 7:00 – 15:00 horas y terminando con el periodo de las 23:00 – 7:00 horas (del otro día). Para que el máximo sea considerado válido se debe tener disponible por lo menos el promedio para 13 periodos.

En el caso de que un VC de ozono sea mayor a la norma de ozono, siempre se considera el VC como válido. Si el VC es menor o igual a la norma, para que los datos se consideran válidos se debe cumplir que se encuentren disponibles por lo menos el 90% de los días en la época de ozono, en promedio, para los tres años.

[111] El test de sustitución de datos se utiliza en casos extremos de falta de datos de calidad del aire en una estación de monitoreo, por lo que en el contexto de evaluar los SILs no se aplicaría este test, y se consideraría que la base de datos no es suficiente. Bajo el criterio de esta consultoría, una base de datos con una falta de datos que requiera un test de sustitución no se podría utilizar para el cálculo de los SILs.

[112] En EE.UU. se establece una "época de ozono" para cada estado. En ese periodo se debe monitorear las concentraciones de O_3.

6.4 Aplicación al contexto nacional

Para aplicar la metodología de la USEPA y obtener los SILs del $MP_{2,5}$ y O_3 se seleccionaron 10 estaciones de monitoreo que pertenecen a la red de monitoreo de calidad del aire (SINCA). Adicionalmente, se replicó la metodología de la USEPA para el cálculo de los SILs de los VC de MP_{10}, NO_2, CO y SO_2. Esto se describe en la presente subsección.

Además, la metodología descrita en la Sección 6.3 requiere que se revisen los criterios de completitud del registro de datos de calidad del aire en la normativa chilena. En la Tabla 6-1 se observa una comparación entre los criterios de completitud de datos de calidad del aire de EE.UU. y Chile. En general, no existen mayores diferencias entre los requisitos de completitud de datos establecidos por ambos países en el caso del $MP_{2,5}$ y el ozono. Sin embargo, para el caso del $MP_{2,5}$ diario y anual se observa que en EE.UU. se toma en cuenta la completitud de datos a escala trimestral, y en la normativa chilena a escala mensual. Adicionalmente, en el caso del $MP_{2,5}$ diario, EE.UU. establece un requisito de porcentaje mínimo de promedios diarios por trimestre, en cambio en la normativa chilena solo se establece que deben existir monitoreo en uno de cada tres días. Por último, en el caso del ozono en EE.UU. se establece una época de ozono, en cambio, en Chile se monitorea la concentración todo el año y difieren los porcentajes de completitud aceptable de los máximos promedios de 8 horas en el año.

Tabla 6-1 Comparación de criterios de completitud de base de datos de calidad del aire de EE.UU. y Chile

Valor de Cumplimiento (VC)	Criterio EE.UU[1]	Criterio Chile[2]
$MP_{2,5}$ anual	Un año se considera válido cuando se tiene el 75% de datos diarios por trimestre.	Un año se considera válido cuando se tiene disponible un registro de 11 meses válidos. Un mes es válido cuando se tiene disponible el 75% de datos diarios del mes.
$MP_{2,5}$ diario	Al igual que $MP_{2,5}$ anual, un año se considera válido cuando se tiene el 75% de datos diarios por trimestre.	Por lo menos un dato diario cada tres días.
O_3	Para que el cálculo del promedio de 8 horas sea considerado válido, el promedio debe considerar por lo menos seis concentraciones horarias de ozono. Para que los datos se consideren válidos se debe cumplir que se encuentren disponibles por lo menos el 90% de los días en la época de ozono, en promedio, para los tres años.	Se considera válida la concentración de 8 horas, si, a lo menos, el 75% de los datos de concentración de 1 hora para un periodo de 8 horas se encontraran disponibles. El cálculo de VC se considera válido si el 75% de los datos de los máximos diarios de concentración de 8 horas para el periodo de un año.

1 "40 CFR Appendix N to part 50 – Interpretation of the National Ambient Air Quality Standards for PM2.5" (US-EPA, 2021) y "40 CFR Appendix U to Part 50 - Interpretation of the Primary and Secondary National Ambient Air Quality Standards for Ozone" (US-EPA, 2016).
2 DS N°12 - Establece Norma Primaria de Calidad Ambiental para Material Particulado Fino Respirables $MP_{2,5}$ (MMA, 2011) y DS N°112 - Establece norma primaria de calidad de aire para ozono (O_3) (MINSEGPRES, 2003).

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 6-2 se observan las estaciones de monitoreo seleccionadas, y la disponibilidad y el tipo de los datos de los contaminantes analizados —en particular, diarios u horarios—.

Tabla 6-2 Disponibilidad de datos de calidad del aire por estación de monitoreo seleccionada

Estación	Comuna	Región	Contaminante	Año inicio
Calama Centro	Calama	Antofagasta	$MP_{2,5}$	2015
			MP_{10}	2014
			O_3	2014
			NO_2	2013
			CO	2015
			SO_2	2014
Las Condes	Las Condes	Metropolitana	$MP_{2,5}$	2000
			MP_{10}	2000
			O_3	2000
			NO_2	2006
			CO	2000
Parque O'Higgins	Santiago		$MP_{2,5}$	2015
			MP_{10}	2015
			O_3	2000
			NO_2	2009
			CO	2017
Pudahuel	Pudahuel		CO	2000
Coyhaique II	Coyhaique	Aysén	$MP_{2,5}$	2016
			MP_{10}	2016
			O_3	2018
			NO_2	2014*
			CO	2017
Osorno	Osorno	Los Lagos	$MP_{2,5}$	2013
			MP_{10}	2013
Kingston College	Concepción	Biobío	$MP_{2,5}$	2017
			MP_{10}	2016
			O_3	2017
			NO_2	2017
			CO	2017
Concón	Concón	Valparaíso	$MP_{2,5}$	2017
			MP_{10}	2016
			O_3	2002
			NO_2	2002
			CO	2003
			SO_2	2013
Quintero	Quintero		$MP_{2,5}$	2017
			MP_{10}	2017
			O_3	2016
			NO_2	2019
			CO	2016
			SO_2	2017
Puchuncaví	Puchuncaví		$MP_{2,5}$	2017
			MP_{10}	2017
			O_3	2017
			NO_2	2019
			SO_2	2017

(*) En este caso se analizó el periodo entre 2014 y 2016. No se incluyeron registros posteriores al 2016 por la incompletitud de estos datos.

Fuente: Elaboración propia

6.4.1 Cálculo de SILs para $MP_{2,5}$, MP_{10}, O_3, NO_2, CO y SO_2

La metodología descrita por la USEPA solo incluye el cálculo de los SILs relacionados a los VC del $MP_{2,5}$ y O_3.

Para el cálculo de los SILs de los otros contaminantes (MP_{10}, NO_2, CO y SO_2) se homologó el procedimiento de la USEPA según los VC descritos en las normas de calidad del aire chilena[113]. Esto quiere decir que para obtener los SILs de estos contaminantes se realizó el mismo método de *bootstrapping* y las ecuaciones para el cálculo de los SILs (Ecuación 6-1 y Ecuación 6-2) considerando el VC pertinente a cada contaminante.

En general, se identificaron cuatro VC que se repiten en las normativas de los contaminantes mencionados. Estos VC son: anual, diario, horario y máximo de 8 horas:

- **VC anual**: es el **promedio de las concentraciones diarias** de un año. Este es el VC que considera la USEPA para el cálculo del VC de $MP_{2,5}$ anual.
- **VC diario**: es el **percentil 98 de las concentraciones diarias** de un año. Este es el VC que considera la USEPA para el cálculo del VC de $MP_{2,5}$ diario.
- **VC horario**: es el percentil 99 o 98,5[114] de las concentraciones horarias de un año.
- **VC máximo de promedio diario de 8 horas:** es el percentil 99 de las máximas concentraciones diarias de 8 horas de un año. Es similar al VC considerado por la USEPA para el caso del O_3, la diferencia es que la USEPA establece que es el cuarto mayor valor de las máximas concentraciones diarias de 8 horas de un año.

Al igual que en el caso de la USEPA se considera como VC final el promedio de los VC de tres años sucesivos. En la Tabla 6-3 se presentan los tipos de VC y los contaminantes que están normados según estos.

Tabla 6-3 Valores de Cumplimiento asociados a los contaminantes analizados

Valor de Cumplimiento (VC)	Contaminantes
Anual	$MP_{2,5}$, MP_{10}, NO_2, y SO_2
Diario	$MP_{2,5}$, MP_{10}, SO_2
Horario	NO_2, CO, SO_2
Máximo diario de 8 horas	CO, O_3

Fuente: Elaboración propia

[113]DS Nº59 - Establece norma de calidad primaria para material particulado respirable MP_{10}, en especial de los valores que definen situaciones de emergencia (MINSEGPRES; CONAMA, 1998), DS Nº114 - Establece norma primaria de calidad de aire para dióxido de nitrógeno (NO_2) (MINSEGPRES, 2002a), DS Nº115 – Establece norma primaria de calidad de aire para monóxido de carbono (CO) (MINSEGPRES, 2002b), y DS Nº104 - Establece norma primaria de calidad de aire para dióxido de azufre (SO_2) (MMA, 2019).

[114] La normativa del SO_2 es la única que considera el percentil 98,5 actualmente.

El cálculo de los SILs se realizó a partir de registros nacionales de calidad del aire con el usó del software R, el cual permite implementar la metodología descrita en la Sección 6.2. En el Anexo 9 (Sección 0) se describe con mayor detalle la manera en que se utilizó R para obtener los resultados de los SILs, así como los archivos de apoyo para la implementación de este método, incluidos en los anexos digitales.

6.4.2 Resultados SILs estimados

En esta sección se presentan los gráficos con los resultados de la aplicación de la metodología para el cálculo de los SILs de la USEPA, correspondientes a diferentes VC de los contaminantes de interés ($MP_{2,5}$, MP_{10}, NO_2, CO, y SO_2). Para comparar los resultados obtenidos, las estaciones de monitoreo se clasificaron en cuatro zonas geográficas, definidas de acuerdo con ciertas características geográficas y meteorológicas, así como por las principales fuentes de emisión que afectan la calidad del aire en estas. Esta clasificación se presenta en la Tabla 6-4, junto con las estaciones de monitoreo seleccionadas para cada zona (ver Tabla 6-2).

Tabla 6-4 Estaciones de monitoreo seleccionadas según zona

Zona	Estaciones de monitoreo seleccionadas
Norte	Calama Centro
Centro	Las Condes, Parque O'Higgins, Pudahuel
Sur	Osorno, Coyhaique II
Costa	Concón, Quintero, Puchuncaví, Kingston College

Fuente: Elaboración propia

En los gráficos se observa en colores las diferentes zonas en que se clasificaron las estaciones de monitoreo. Adicionalmente, se diferencian las estaciones de monitoreo escogidas con la forma de las marcas de puntuación. En cuanto a la estructura de estos gráficos, por un lado, en el eje horizontal se presenta el año de inicio del periodo trianual evaluado para el cálculo de cada SIL. Es decir, si el valor se indica en el año "2015", entonces este corresponde al periodo "2015, 2016 y 2017". Por otro lado, en el eje vertical se señala el valor del SIL calculado en µg/m^3. En todos los gráficos, la línea horizontal negra es el valor del **SIL en [µg/m^3] establecido por la USEPA** para el VC del contaminante (ver Sección 3.1.1, Tabla 3-4).

En estos gráficos también se presenta un valor de **SIL ponderado calculado con los datos de las estaciones de monitoreo nacionales seleccionadas del SINCA**. Este SIL ponderado se calculó siguiendo los siguientes pasos:

1. Se obtuvo la mediana de los valores de los SILs calculados en cada estación de monitoreo —para periodos de tres años consecutivos—.
2. Se promediaron las medianas de los SILs de las estaciones de monitoreo dentro de cada zona.
3. Se promediaron los SILs promediados por zona, para estimar un único valor. Este valor corresponde al SIL [µg/m^3] de la mediana ponderada estimada para Chile a partir de SIL porcentual estimado y la NPCA.

En los gráficos este resultado de SIL ponderado se presenta con una la línea horizontal puntuada con puntos alargados.

Asimismo, en los gráficos se observa una línea horizontal puntuada con puntos cortos que corresponden a los valores de los **SILs calculados a partir de los SILs porcentuales de la USEPA para EE.UU. y las NPCA de Chile** correspondiente al VC de cada contaminante. El objetivo de calcular estos incrementos es evaluar el resultado de aplicar el criterio de los SILs porcentuales de la USEPA para EE.UU. a las normativas chilenas de calidad del aire debido a que los SILs en [µg/m^3] recomendados para EE.UU. están calculados en base a los NAAQS que son diferentes a las NPCA. Generalmente, los NAAQS tienen valores más restrictivos que las normativas de calidad del aire nacionales por lo que los SILs en [µg/m^3] serían diferentes para cada país. Se debe recordar que los SILs porcentuales definidos por la USEPA representan la variabilidad del registro de calidad del aire de EE.UU. En los gráficos se pueden comparar estos valores con los SILs obtenidos a partir del registro de calidad del aire del SINCA y las normativas chilenas de calidad del aire, y los valores en [µg/m^3] recomendados por la USEPA para EE.UU. —calculados a partir de los SILs porcentuales de la USEPA y los NAQQS—.

En resumen, en los gráficos se observan diferentes líneas con diferentes marcas de puntuación (puntos de diferentes formas) y tres tipos de líneas horizontales (continua, de puntos alargados y puntos cortos), los cuales se describen brevemente a continuación:

- **Líneas con puntos diferentes:** son los SILs calculados a partir de los datos de cada estación de monitoreo nacional (base de datos del SINCA) y las NPCA considerando un periodo de tres años. La forma del punto de la línea diferencia la estación de la que provienen los datos y el color de la línea especifica la zona en la que se clasificó la estación de monitoreo.
- **Línea horizontal continua:** son los SILs recomendados por la USEPA en [µg/m^3] para EE.UU. Lo que corresponden a los valores calculados a partir de los SILs porcentuales recomendados por la USEPA y los propios NAAQS de EE.UU.
- **Línea horizontal de puntos alargados:** son los SILs correspondientes a la mediana ponderada estimada para Chile a partir de los SILs porcentuales estimados con los datos del registro chileno de calidad del aire, SINCA, y las NPCA.
- **Línea horizontal de puntos cortos:** son los SILs calculados para Chile a partir de los SILs porcentuales recomendados por la USEPA para EE.UU. y las NPCA de Chile.

En las siguientes subsecciones se presentan los resultados obtenidos por contaminante, así como un resumen de este análisis.

6.4.2.1 $MP_{2,5}$

A continuación, se presentan los resultados del cálculo de los SILs relacionados a los VC de $MP_{2,5}$ anual y diario.

En la Figura 6-1 se muestran los SILs de $MP_{2,5}$ anual obtenidos para periodos trianuales desde el 2000 hasta el año 2021, de distintas estaciones de monitoreo. Se observa que los SILs son menores en las estaciones ubicadas en la zona Sur. Adicionalmente, se identifica una tendencia a la baja de los valores de los SILs desde el periodo que inicia en 2015 en diferentes estaciones de monitoreo. Finalmente, se observa que el SIL ponderado estimado a partir del registro del SINCA, 0,25 µg/m^3, es mayor que el límite 0,20 µg/m^3 establecido por la USEPA, pero menor que el valor de SIL estimado a partir del SIL porcentual de la USEPA y la NPCA, 0,33 µg/m^3.

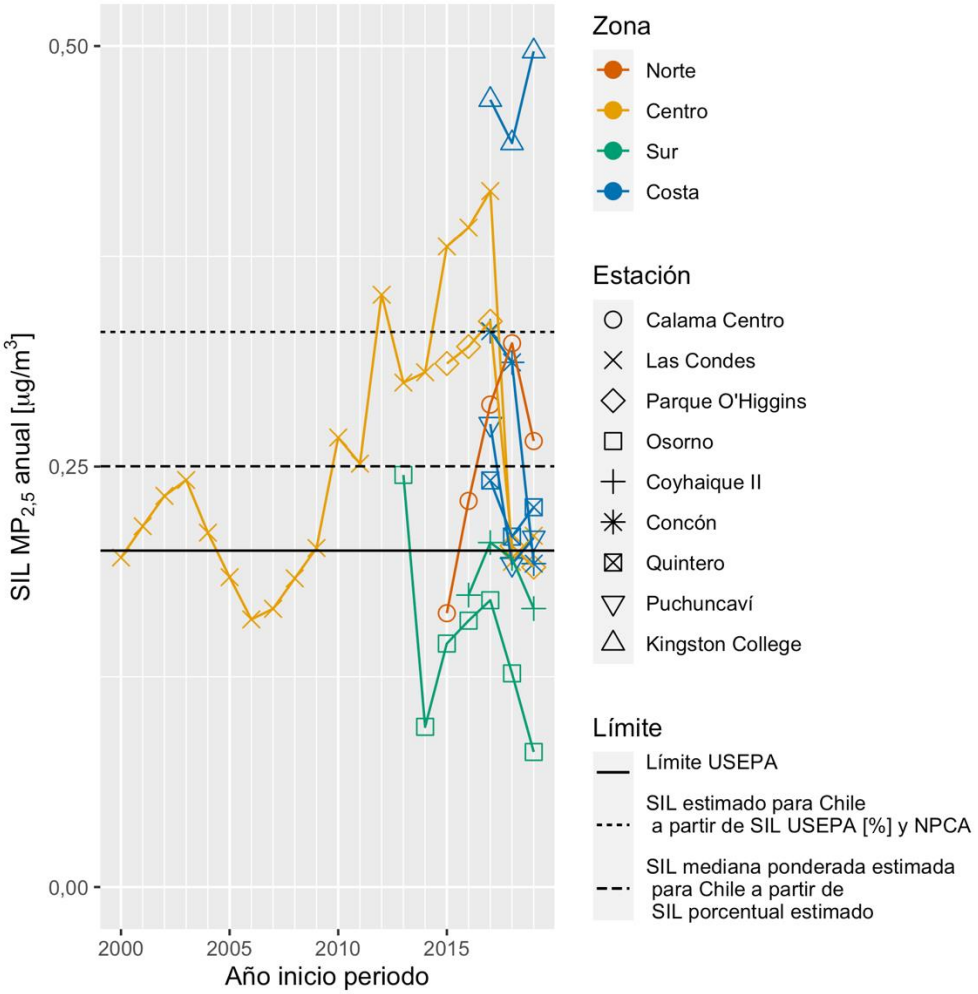


Figura 6-1 Resultados SILs de $MP_{2,5}$ anual
Fuente: Elaboración propia

Los resultados de los SILs de $MP_{2,5}$ diario muestran patrones diferentes a los observados en el caso de los SILs de $MP_{2,5}$ anual. En la Figura 6-2 se observa que las estaciones en la zona Sur son las que presentan los mayores valores de SILs, a diferencia de los resultados de los SILs de $MP_{2,5}$ anuales de estas estaciones. Adicionalmente, se identifica que entre los periodos de 2015 y 2019 los valores de los SILs, para la mayoría de las estaciones, son cercanos a 1 µg/m^3. Al igual que en el caso del SIL de $MP_{2,5}$ anual, se observa que el SIL ponderado 1,3 µg/m^3 es levemente superior al límite 1,2 µg/m^3 establecido por la USEPA y menor que el valor de SIL estimado a partir del SIL porcentual de la USEPA y la NPCA, 1,7 µg/m^3.

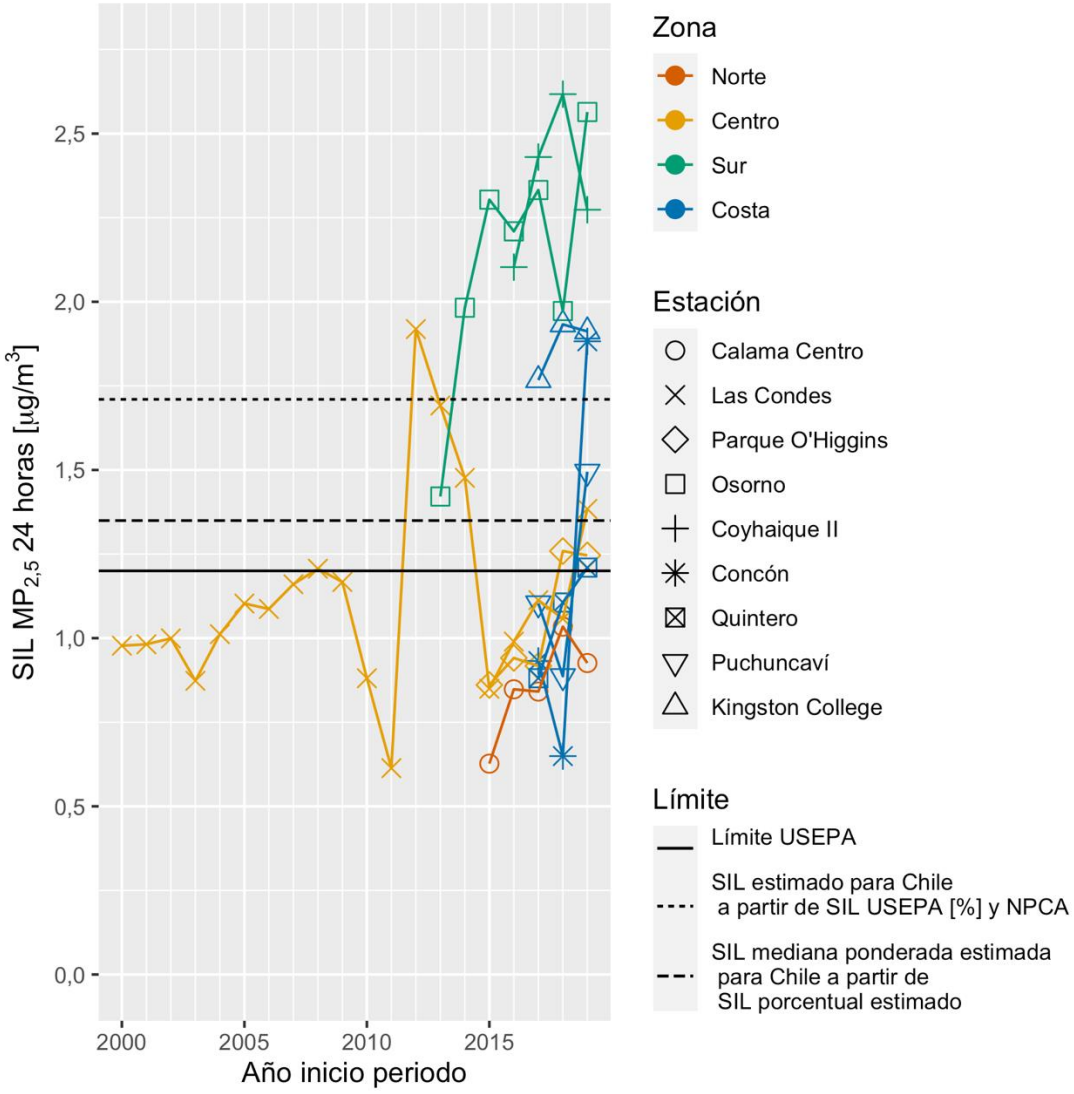
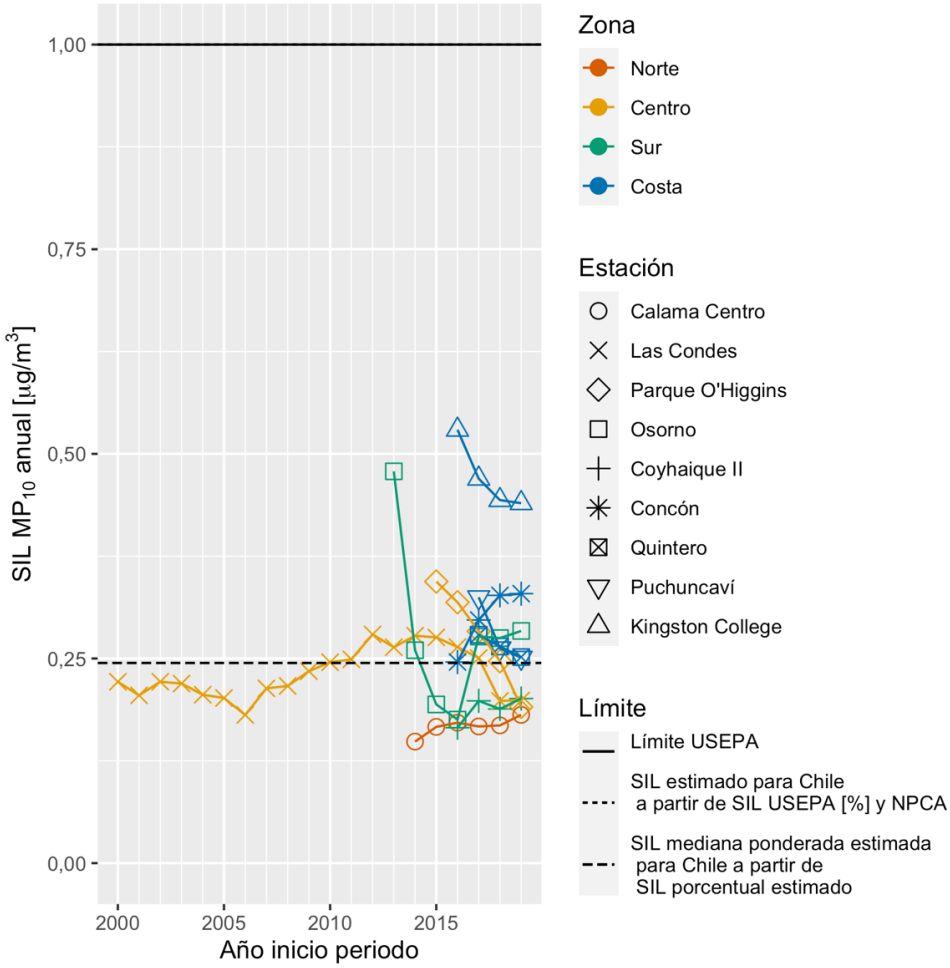


Figura 6-2 Resultados SILs de $MP_{2,5}$ diario
Fuente: Elaboración propia

6.4.2.2 MP_{10}

Los resultados del cálculo de los SILs relacionados a los VC de MP_{10} anual y diario se presentan en la siguiente sección.

En la Figura 6-3 se muestran los resultados de los SILs de MP_{10} anual para las diferentes estaciones de monitoreo seleccionadas. Desde el periodo de 2015, se observa que en general los valores de los SILs son relativamente cercanos a 0,25 µg/m^3, a excepción de los valores de la estación de Kingston College ubicada en Concepción. En este caso, la estación presenta valores cercanos a los 0,5 µg/m^3. Adicionalmente, el límite de SIL de MP_{10} anual de la USEPA y del estimado a partir del SIL porcentual de la USEPA y la NPCA, es de 1,00 µg/m^3 [115], mayor al valor del SIL ponderado (0,24 µg/m^3).

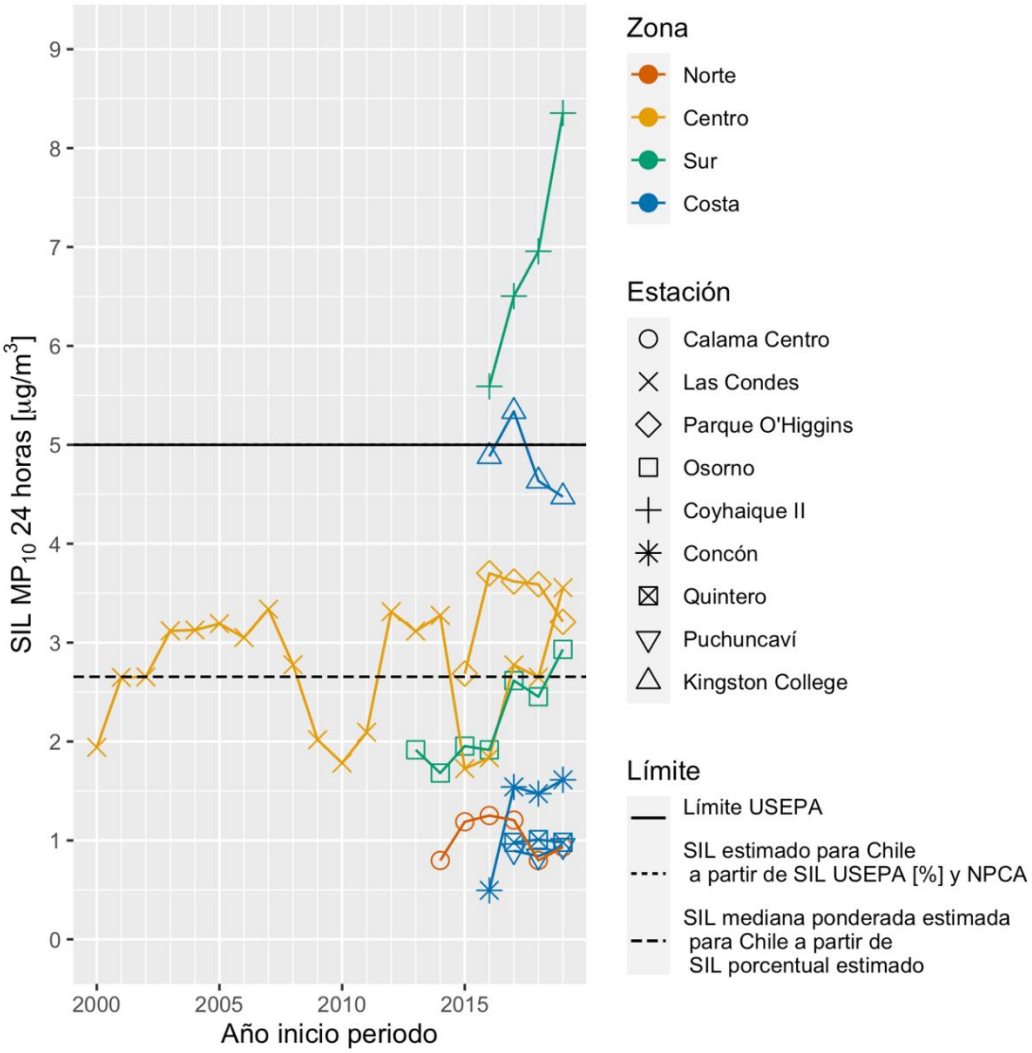


Los valores del Límite USEPA y el SIL estimado para Chile a partir de SIL USEPA [%] y NPCA son el mismo. Por esta razón, no se visualiza la línea de el SIL estimado para Chile a partir de SIL USEPA [%] y NPCA

Figura 6-3 Resultados SILs de MP_{10} anual
Fuente: Elaboración propia

[115] Estos valores son idénticos porque el último valor de la norma anual de EE.UU. es igual a la actual NPCA en Chile.

En la Figura 6-4 se muestran los resultados de SILs de MP_{10} diario. Los mayores valores de SILs de MP_{10} diario se estimaron en la estación Coyhaique II. En general, no se observa una tendencia clara por zona, por ejemplo, los valores de las estaciones Calama Centro, Quintero y Concón son similares a pesar de que la primera está en zona norte y las otras dos en zona costera. Otro ejemplo es la similitud entre las estaciones de Las Condes y Osorno, la primera de la zona centro y la segunda en zona sur. Al igual que en el caso del SIL de MP_{10} anual, el límite determinado por la USEPA y, el estimado a partir del SIL porcentual de la USEPA y la NPCA, es de 5,0 $\mu g/m^3$ [116], mayor al SIL ponderado (2,7 $\mu g/m^3$).



Los valores del Límite USEPA y el SIL estimado para Chile a partir de SIL USEPA [%] y NPCA son el mismo. Por esta razón, no se visualiza la línea de el SIL estimado para Chile a partir de SIL USEPA [%] y NPCA.

Figura 6-4 Resultados SILs de MP_{10} diario
Fuente: Elaboración propia

[116] Estos valores son idénticos porque el último valor de la norma anual de EE.UU. es igual a la actual NPCA en Chile.

6.4.2.3 O_3

En la sección a continuación se presentan los valores obtenidos de los SILs relacionados a los VC de O_3 máximo diario de 8 horas.

Los resultados de los SILs del máximo diario de 8 horas de O_3 se muestran en la Figura 6-5. Las estaciones que alcanzan los mayores valores de SILs son Las Condes, Concón y Coyhaique II. Con excepción de las estaciones mencionadas, los valores de los SILs para diferentes periodos y estaciones de monitoreo están entre 1 y 2 µg/m³. Por último, se observa que el SIL ponderado (2,20 µg/m³) es mayor al límite 1,96 µg/m³ establecido por la USEPA y el SIL estimado a partir del SIL porcentual de la USEPA y la NPCA es el menor valor; 1,71 µg/m³

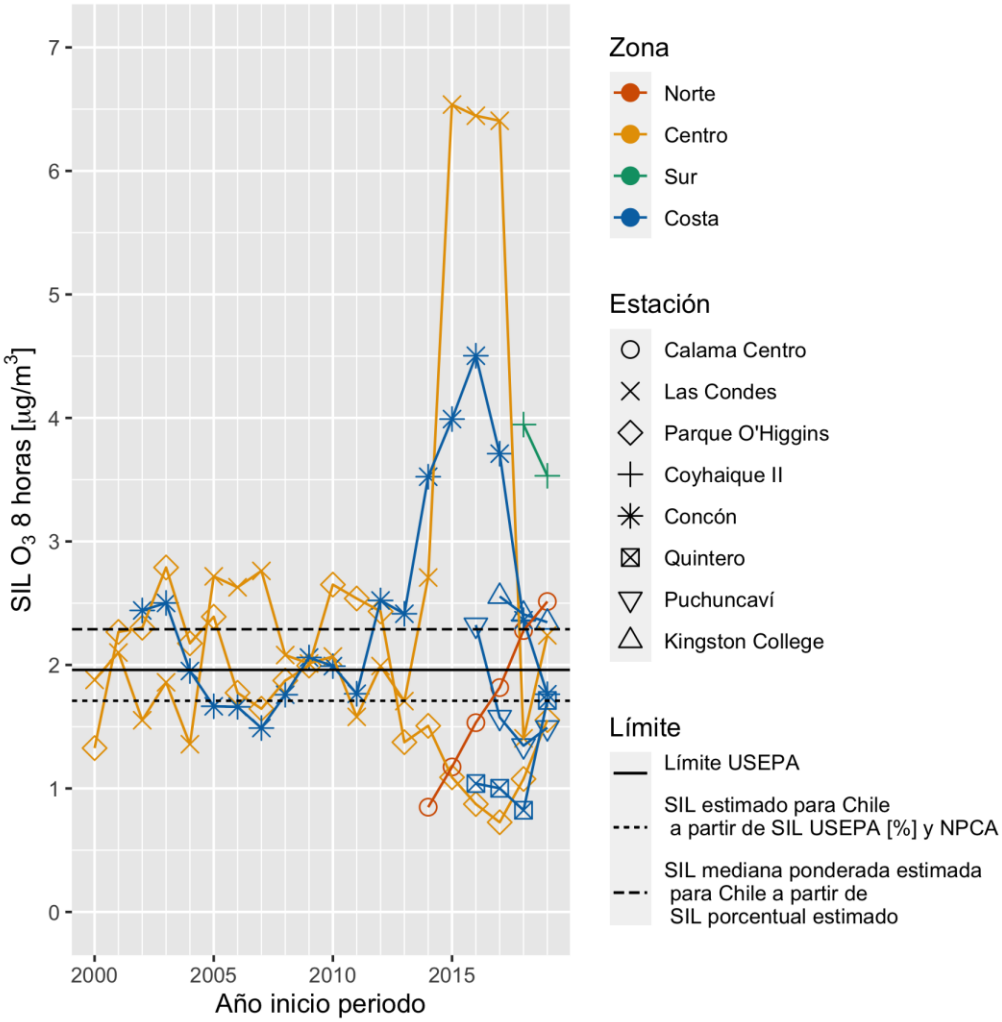
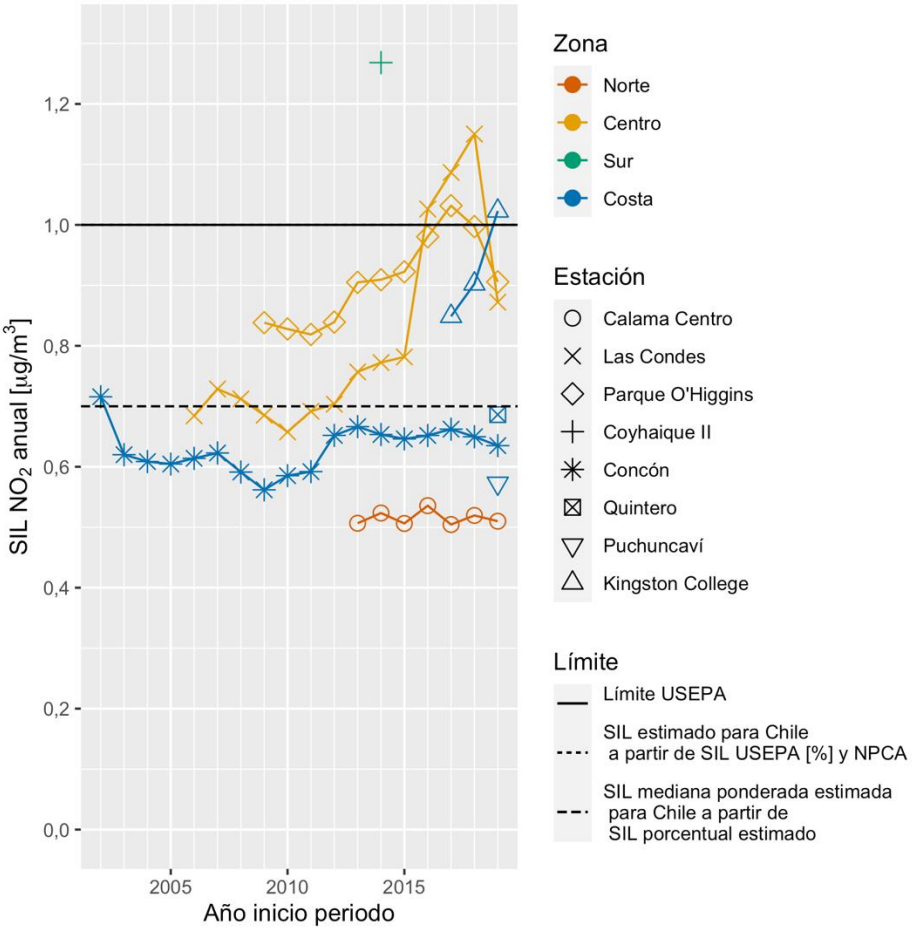


Figura 6-5 Resultados SILs de O_3 8 horas
Fuente: Elaboración propia

6.4.2.4 NO_2

En esta sección se presentan los resultados del cálculo de los SILs relacionados a los VC de NO_2 anual y horario que se calcularon en base a la metodología de la USEPA.

En la Figura 6-6 se observan los resultados de los SILs de NO_2 anual. En general, las estaciones de la zona Centro presentan los mayores valores de SILs de NO_2 anual y la estación Calama Centro es la presenta menores valores. Los valores de los SILs de las estaciones de Calama Centro y Concón no presentan variaciones fundamentales en los diferentes periodos. El SIL ponderado (0,7 µg/m^3) es inferior al valor del límite establecido por la USEPA, el cual es igual al valor del SIL estimado a partir del SIL porcentual de la USEPA y la NPCA; 1,0 µg/m^3.



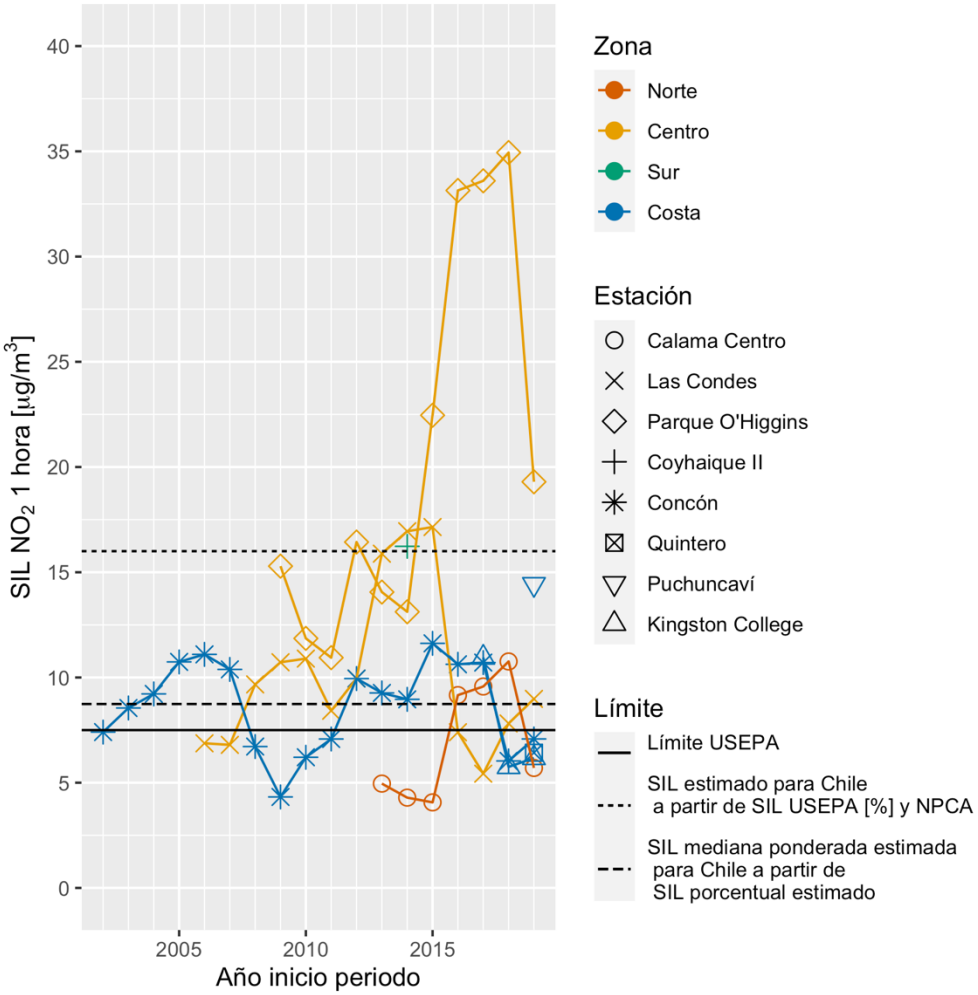
Para el cálculo del SIL ponderado no se incluyeron las estaciones que tienen el valor de un solo periodo. En este caso se excluyeron las estaciones de Quintero, Puchuncaví y Coyhaique II.

Figura 6-6 Resultados SILs de NO_2 anual

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de los SILs de NO_2 horario se muestran en la Figura 6-7. La estación Las Condes es la que presenta los mayores valores de SILs de NO_2 horario y las estaciones Calama Centro y

Concón son las que presentan menores valores dependiendo el periodo. Adicionalmente, se observa que en los periodos 2016, 2017 y 2018 los valores de los SILs son significativamente mayores en Parque O'Higgins (entre 33 y 35 µg/m^3)[117]. En este caso, el valor del SIL de la USEPA, 7,50 µg/m^3, es menor que el SIL ponderado (8,77 µg/m^3), mientras que el SIL estimado a partir del SIL porcentual de la USEPA y la NPCA es el valor más alto de los tres límites observados; 16 µg/m^3.



Para el cálculo del SIL ponderado no se incluyeron las estaciones que tienen el valor de un solo periodo. En este caso se excluyeron las estaciones de Quintero, Puchuncaví y Coyhaique II.

Figura 6-7 Resultados SILs de NO_2 horario
Fuente: Elaboración propia

[117] Estos valores significativamente mayores podrían ser por la mayor variabilidad que se observa en el registro horario de NO_2 de los años 2017, 2018 y 2019 de la estación Parque O'Higgins. Recordar que el SIL presentado considera en su cálculo los valores de los dos años posteriores al año en que se indican (total de tres años considerados).

6.4.2.5 CO

A continuación, se presentan los valores del cálculo de los SILs relacionados a los VC de CO horario y máximo diario de 8 horas obtenidos en base al cálculo de la USEPA.

En la Figura 6-8 se observan los resultados de los SILs de CO horario. En general, los valores de los SILs son estables y están alrededor de 1.000 µg/m^3, con excepción de las estaciones Las Condes y Quintero que presentan valores mayores. En especial, en la estación Las Condes los valores de SILs son significativamente mayores en los periodos 2008, 2009 y 2010 (3.360, 4.257 y 14.065 µg/m^3, respectivamente)[118]. El SIL ponderado (1.030 µg/m^3) y SIL estimado a partir del SIL porcentual de la USEPA y la NPCA (1.500 µg/m^3) son menores al SIL establecido por el límite de la USEPA, 2.000 µg/m^3.

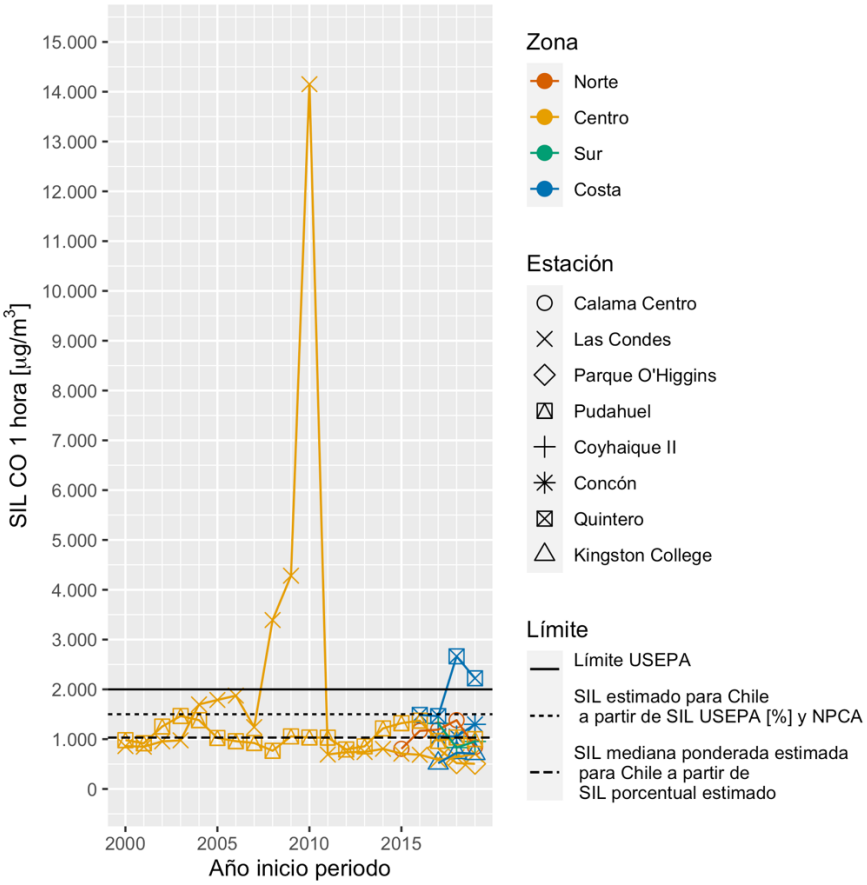


Figura 6-8 Resultados SILs de CO horario
Fuente: Elaboración propia

[118] En el registro horario de CO de la estación Las Condes, se observan mayores valores de concentración de CO en los años 2009 y 2010 que podrían afectar a la variabilidad de los datos.

Los resultados de los SILs de CO máximo diario de 8 horas se muestran en la Figura 6-9. Desde el periodo de 2015, se observa una tendencia similar entre los valores de SILs calculados para las estaciones. En estos periodos, los mayores valores se presentan en las estaciones de Concón y Coyhaique II, y los menores valores se encuentran en la estación de Calama Centro, correspondiente a la zona norte. El límite establecido por la USEPA es de 500 µg/m^3, y el SIL estimado a partir del SIL porcentual de la USEPA y la NPCA es de 488 µg/m^3, cuyos valores son similares. Ambos, en este caso, son mayores al SIL ponderado (308 µg/m^3).

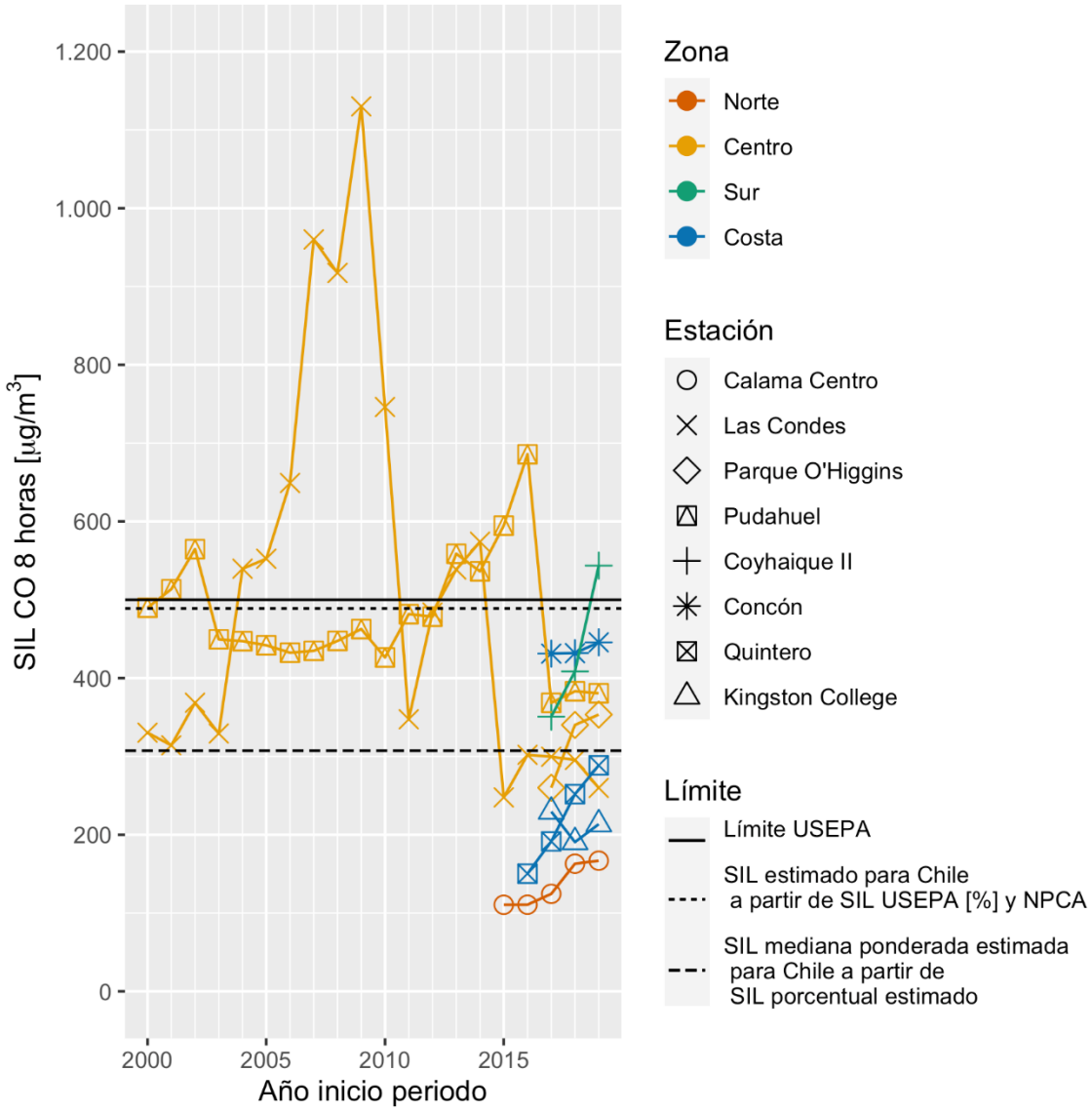
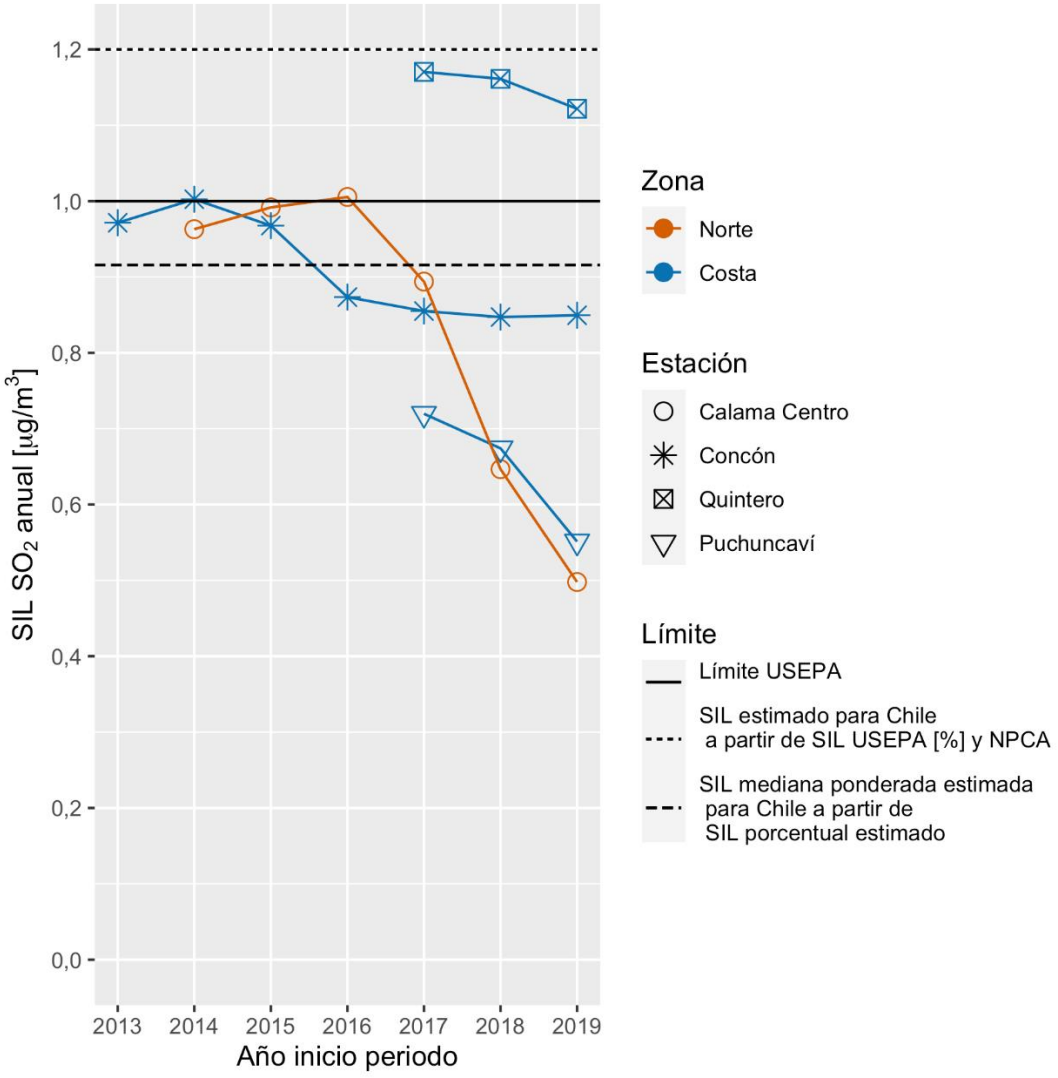


Figura 6-9 Resultados SILs de CO máximo diario de 8 horas
Fuente: Elaboración propia

6.4.2.6 SO_2

A continuación, se presentan los resultados del cálculo de los SILs relacionados a los VC de SO_2 anual, diario y horario.

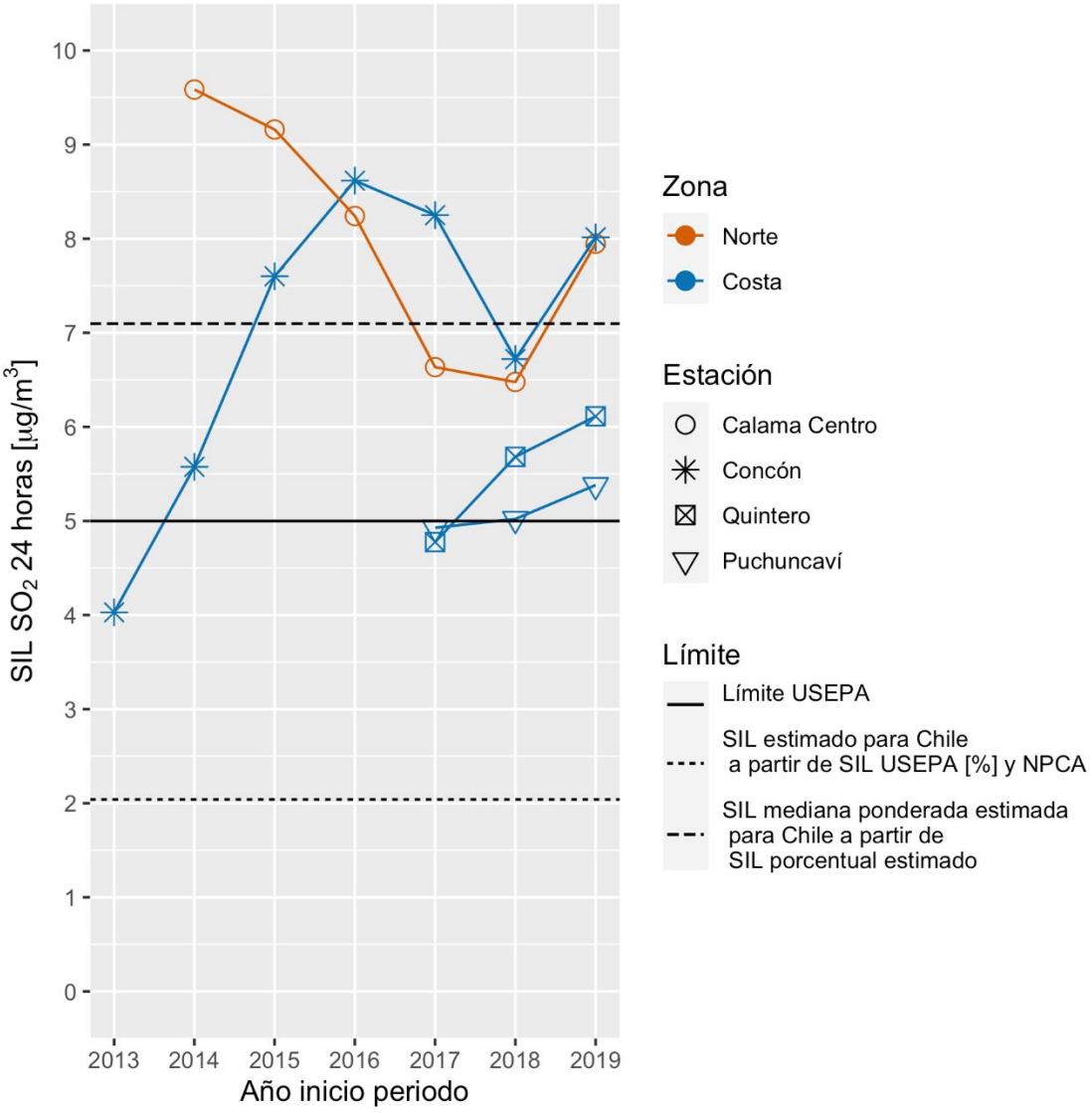
En la Figura 6-10 se muestran los resultados de los SILs de SO_2 anual. Las estaciones seleccionadas solo se encuentran en la zona norte y en la costa. Los mayores valores de SILs de SO_2 anual se presentan en la estación de Quintero, mientras que los menores valores se calcularon en las estaciones de Calama Centro y Puchuncaví. El límite 1,00 µg/m³ de la USEPA es mayor al valor del SIL ponderado (0,92 µg/m³) y el valor del SIL estimado a partir del SIL porcentual de la USEPA y la NPCA, 1,2 µg/m³, es mayor a ambos valores.



Se realizó el cálculo de los SILs de SO_2 anual solo para las estaciones de monitoreo cercanas a zonas saturadas o críticas respecto a este contaminante, dentro de las seleccionadas.

Figura 6-10 Resultados SILs de SO_2 anual
Fuente: Elaboración propia

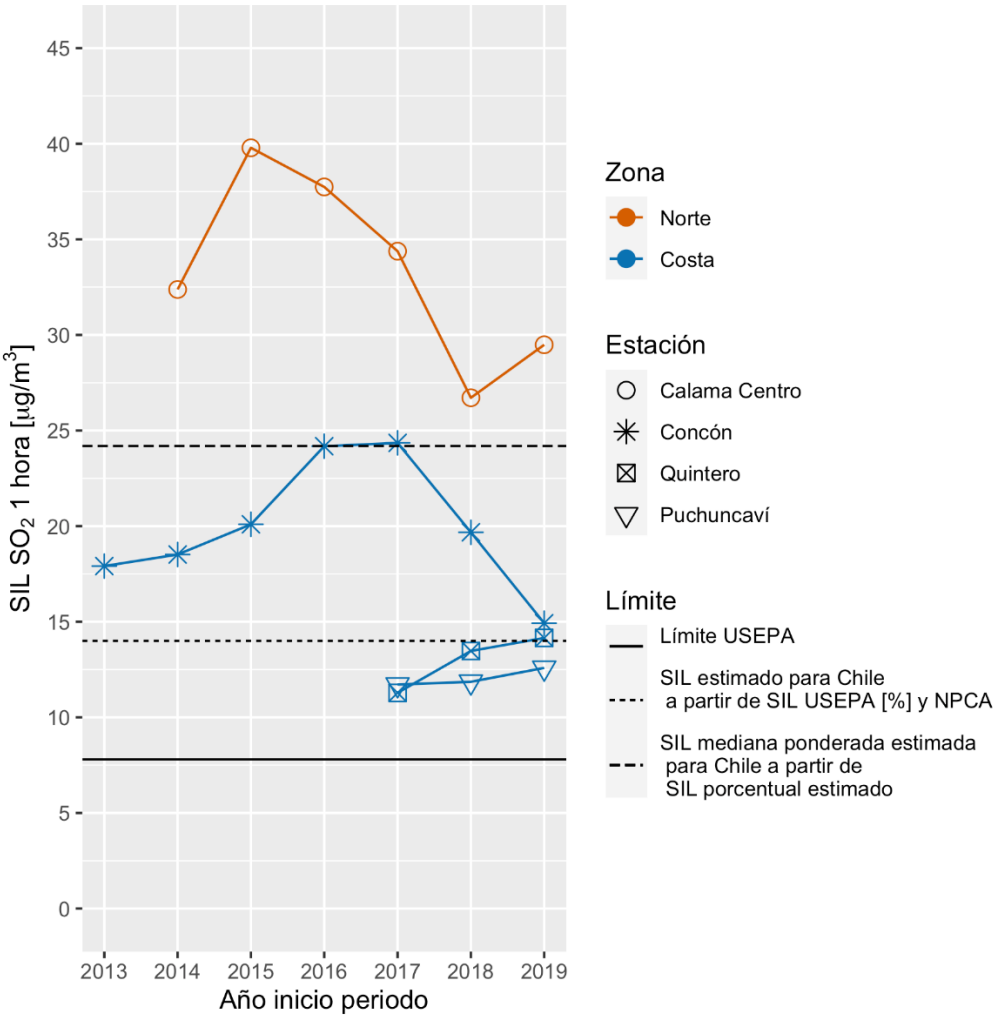
Los resultados de los SILs de SO_2 diario se muestran en la Figura 6-11. Se realizó el cálculo de los SILs de SO_2 anual solo para las estaciones de monitoreo cercanas a zonas saturadas respecto a este contaminante, dentro de las seleccionadas. Los resultados de los SILs de SO_2 diario se diferencian con los de SO_2 anual, en este caso los mayores valores se presentan en la estación de Concón. Los menores valores de SILs se presentan en la estación de Puchuncaví. El valor del límite de la USEPA, 5,0 µg/m³, es inferior que el SIL ponderado (7,1 µg/m³) estimado. El SIL estimado a partir del SIL porcentual de la USEPA y la NPCA es el menor valor entre los tres límites expuestos, 2,0 µg/m³.



Se realizó el cálculo de los SILs de SO_2 anual solo para las estaciones de monitoreo cercanas a zonas saturadas o críticas respecto a este contaminante, dentro de las seleccionadas.

Figura 6-11 Resultados SILs de SO_2 diario
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 6-12 se muestran los resultados de los SILs de SO_2 horario. Se realizó el cálculo de los SILs de SO_2 anual solo para las estaciones de monitoreo cercanas a zonas saturadas o críticas respecto a este contaminante, dentro de las seleccionadas. La estación de Calama Centro es la que presenta los valores más altos de SILs y la estación de Puchuncaví es la que presenta los menores valores de SILs. El SIL ponderado (26,5 µg/m^3) es casi 3,5 veces[119] el valor del SIL establecido por la USEPA, 7,8 µg/m^3. Sin embargo, el SIL estimado a partir del SIL porcentual de la USEPA y la NPCA, 14 µg/m^3, es menor al SIL ponderado, pero mayor al SIL establecido por la USEPA.



Se realizó el cálculo de los SILs de SO2 anual solo para las estaciones de monitoreo cercanas a zonas saturadas o críticas respecto a este contaminante, dentro de las seleccionadas.

Figura 6-12 Resultados SILs de SO_2 horario
Fuente: Elaboración propia

[119] Una de las posibles razones de la gran diferencia entre el SIL ponderado y el establecido por la USEPA es el bajo número de estaciones de monitoreo que fueron seleccionadas para el análisis.

6.4.2.7 Resumen de resultados de SIL ponderado

En la Tabla 6-5 se muestran los valores de los SIL porcentuales establecidos por la USEPA y aquellos que se calcularon a partir los VC de los diferentes contaminantes de interés con los datos observados de las estaciones de monitoreo nacionales. Se observa que los valores de SILs porcentuales establecidos por la USEPA generalmente son mayores a los calculados con los datos de calidad de aire de las estaciones seleccionadas de la red nacional de monitoreo. Como se observa en la tabla, los únicos casos en que la diferencia absoluta entre el límite de la USEPA y SIL porcentual ponderado es mayor a 1% son los SILs de NO_2 horario, CO (horario y 8-horas) y SO_2 (horario y diario). Asimismo, en la Tabla 6-6 se muestran los valores de SILs recomendados por la USEPA en [µg/m^3]. También en esta tabla se presentan los SILs estimados al multiplicar el SIL porcentual recomendado por la USEPA con los valores de las NPCA, y los SILs estimados al multiplicar el SIL porcentual obtenido a partir del registro de calidad del aire (SINCA) con los valores de las NPCA (ver Sección 6.4.2 para mayores detalles). En esta tabla se observa que los valores más altos corresponden a los estimados al multiplicar el SIL porcentual recomendado por la USEPA con los valores de las NPCA y que los valores de las otras dos columnas de SILs mencionados son similares.

A partir de los resultados presentados en la Sección 6.4.2, se selecciona como recomendación definitiva utilizar los valores de SIL porcentuales definidos por la USEPA para el incremento en la concentración de contaminantes atmosféricos, destacados en letra negrita en la Tabla 6-5. Al realizar esta recomendación se tiene en consideración que estos valores no son aplicables en zonas saturadas en EE.UU., pero son replicables en el contexto estudiado en esta consultoría. Debido a que se fundamentan principalmente en la variabilidad intrínseca de los registros de calidad del aire debido a las emisiones y meteorología propia de cada lugar y representa un incremento que se “confunde” en la variabilidad propia de este registro. Asimismo, como se indicó previamente, este incremento no se relaciona directamente a niveles de riesgos a la salud, sino que a un análisis estadístico. Por estas razones, los SILs se pueden evaluar tanto para una zona saturada y no saturada.

La elección de esta recomendación, por una parte, se debe principalmente a la complejidad que implica establecer un incremento no significativo basado en el criterio de riesgo aceptable estudiado en la Sección 4. Por esta razón, se eligió la recomendación de la USEPA que está basada en la variabilidad intrínseca de las concentraciones debido a las emisiones y meteorología, y no en base a un nivel de riesgo aceptable sobre la salud.

Por otra parte, se recomiendan los mismos valores porcentuales de incremento establecidos por la USEPA por múltiples motivos. Un primer motivo es que, en la gran mayoría de los casos, el SIL estimado con datos de monitoreo de Chile es cercano al definido por la USEPA, con diferencias absolutas menores a 2%, a excepción del SO_2 de 1 hora y 24 horas, que tiene una diferencia de 2,9% y 3,4%, respectivamente, siendo en la mayoría de los casos menores a un 1%. Un segundo

motivo es que los valores de SILs de la USEPA fueron obtenidos a partir de una muestra mayor y más variada de estaciones de monitoreo. Por ejemplo, para la evaluación del SIL de O_3 se utilizó el registro de 1.708 monitores de EE.UU. y para la evaluación del $MP_{2,5}$ se analizó la información de 1.773 monitores (USEPA, 2018c). Asimismo, los valores definidos por la USEPA tienen el respaldo de esta institución. Un último motivo es la variabilidad de la calidad del aire podría cambiar en el futuro, de modo que se generaría la necesidad de replicar el cálculo con cierta frecuencia, con la consiguiente exigencia en tiempo y recursos que implica esta tarea.

Adicionalmente, cabe destacar que se recomiendan valores de SILs a nivel nacional, porque a juicio experto es políticamente complejo definir diferentes niveles para diferentes zonas geográficas nacionales, dado que con tal diferenciación implícitamente se estaría aceptando exponer a las poblaciones a diferentes niveles de riesgo.

Tabla 6-5 Resumen SILs porcentuales de la USEPA y estimados a partir del registro del SINCA

Contaminante	Periodo	SIL porcentual USEPA*	SIL porcentual estimado a partir de datos del SINCA	Diferencia entre SIL porcentual estimado y SIL porcentual USEPA**
$MP_{2,5}$	24 horas	**3,4%**	2,7%	-0,8%
	anual	**1,7%**	1,3%	-0,4%
MP_{10}	24 horas	**3,3%**	2,7%	-0,6%
	anual	**2,0%**	1,2%	-0,8%
O_3	8 horas	**1,4%**	1,9%	0,5%
NO_2	1 hora	**4,0%**	2,2%	-1,8%
	anual	**1,0%**	0,7%	-0,3%
CO	1 hora	**5,0%**	3,4%	-1,6%
	8 horas	**4,9%**	3,1%	-1,8%
SO_2	1 hora	**4,0%**	6,9%	2,9%
	24 horas	**1,4%**	4,7%	3,4%
	anual	**2,0%**	1,5%	-0,5%

(*) Los SILs porcentuales fueron obtenidos a partir de los SILs en µg/m³ y los NAAQS con la Ecuación 6-2
(**) La diferencia se calculó como el SIL porcentual estimado a partir de los datos del SINCA menos el SIL porcentual de la USEPA. Por lo tanto, si la diferencia es mayor a cero entonces el SIL estimado a partir de datos del SINCA es mayor que el definido por la USEPA.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6-6 Resumen SILs USEPA y estimados para Chile

Contaminante	Periodo	SIL o Límite USEPA [µg/m³], recomendados como criterios aplicables en el marco del SEIA	SIL estimado para Chile a partir de SIL USEPA [%] y NPCA*	SIL mediana ponderada estimada para Chile a partir de SIL porcentual estimado [µg/m³]
$MP_{2,5}$	24 horas	1,2	**1,71**	1,34
	Anual	0,2	**0,33**	0,25
MP_{10}	24 horas	5	**5,00**	2,67
	Anual	1	**1,00**	0,24
O_3	8 horas	2	**1,71**	2,2
NO_2	1 hora	7,5	**16,00**	8,77
	Anual	1	**1,00**	0,7
CO	1 hora	2.000,00	**1500,00**	1.030,71
	8 horas	500	**488,89**	307,87
SO_2	1 hora	7,8	**14,00**	26,56
	24 horas	5	**2,04**	7,1
	Anual	1	**1,20**	0,92

(*) Para calcular estos SILs se multiplicó el SIL porcentual de la USEPA (Tabla 6-5) por los valores de concentración de las NPCA.
Fuente: Elaboración propia

6.4.3 Caso Plomo

En el caso del plomo, si bien es un contaminante para el cual existe una NPCA, no se determinan criterios replicables recomendables. Debido a la falta de registros de concentraciones de Pb en las estaciones de monitoreo nacionales no fue posible replicar la metodología de la USEPA para este contaminante. Adicionalmente, como se mencionó en la Sección 4.1.2.6, el valor límite de este contaminante está relacionado con un umbral aceptable y acordado de pérdida de IQ en niños, es decir, tiene un umbral definido, a diferencia de los otros contaminantes analizados en esta consultoría, por lo que no hay un incremento recomendable asociado. Por estas razones no se proponen criterios de límite de incremento significativo.

6.5 Presentación de los criterios en la forma y fondo que debiesen ser presentados en el marco del SEIA

A modo de síntesis, en la Tabla 6-7 se presentan los criterios recomendados aplicables en el marco del SEIA, al momento de evaluar la significancia del impacto de emisiones atmosféricas (magnitud, duración y extensión) de contaminantes normados generados por proyectos o actividades emplazados en zonas saturadas o en estado de saturación sobre el riesgo para la salud de la población.

Tabla 6-7 Criterios recomendados de incremento significativo en la concentración de contaminantes atmosféricos en zonas saturadas [µg/m³]

Contaminante	Periodo	SIL porcentual USEPA	Incremento significativo en la concentración [µg/m³]
$MP_{2,5}$	24 horas	**3,4%**	1,71
	Anual	**1,7%**	0,33
MP_{10}	24 horas	**3,3%**	5,00
	Anual	**2,0%**	1,00
O_3	8 horas	**1,4%**	1,71
NO_2	1 hora	**4,0%**	16,00
	Anual	**1,0%**	1,00
CO	1 hora	**5,0%**	1.500,00
	8 horas	**4,9%**	488,89
SO_2	1 hora	**4,0%**	14,00
	24 horas	**1,4%**	2,04
	Anual	**2,0%**	1,20
Pb	Anual	Sin recomendación	Sin recomendación

Fuente: Elaboración propia

En cuanto a la incorporación de la variable **duración** en la evaluación de significancia del impacto, el equipo experto propone hacer una distinción entre los proyectos o etapas que duran menos de tres años y los que duran igual o más que este periodo. Esto se debe a que los VC se calculan en base a promedios de tres años. Se propone que, para los proyectos de duración menor a tres años, se realice una modificación a los valores expuestos en la Tabla 6-7 según la duración de exposición al impacto de la etapa. En la Ecuación 6-3 se muestra la modificación propuesta. En palabra simples, la modificación consiste en una ponderación respecto al periodo de tres años, por ejemplo, si la etapa de construcción dura un año, el SIL propuesto para este periodo sería tres veces mayor al SIL propuesto en la Tabla 6-7.

Ecuación 6-3 Modificación de incremento de concentración recomendado según duración

$$\Delta C_m = \Delta C_o * \frac{T}{D}$$

Fuente: Elaboración propia

Donde ΔC_m es el incremento significativo en la concentración modificado y recomendado para una exposición de duración menor a tres años, ΔC_o es el incremento significativo en la concentración recomendado en la Tabla 6-7, T es el periodo en que se evalúa el cumplimiento de la norma —por ejemplo, 3 años— y "D" es la duración del periodo, que sería menor a T.

En el caso de que el proyecto tenga etapas de construcción y de operación, habría que hacer el análisis para ambas fases. Mientras que, para proyectos con fases de operación con duraciones superiores a 3 años, el SIL debería cumplirse para el periodo de mayores emisiones.

6.6 Diagnóstico de las herramientas que posee el SEIA para atender a la incorporación de los criterios escogidos

Los criterios propuestos, presentados en la Sección 6.5, al corresponder a valores de incremento en la concentración de contaminantes atmosféricos, tienen el mismo formato que los valores que el SEIA ya evalúa en los proyectos que modelan su impacto en la calidad del aire.

Por lo anterior, el SEIA ya cuenta con las herramientas para hacer esta evaluación, comparando los incrementos modelados con los valores límite recomendados. Sin embargo, si se quiere **replicar la metodología del cálculo de los SILs** se recomienda:

- Generar y fortalecer en el tiempo las capacidades de **análisis estadístico** de los profesionales del SEA.
- Desarrollar conocimiento sobre el uso del **software R**.

6.7 Identificación de la información ambiental, las herramientas metodológicas y capacidades técnicas, que se requiere incorporar en el funcionamiento del SEIA

Como se indicó previamente en la Sección 6.5, por tratarse de un criterio de la misma forma que los antecedentes que ya se analiza en el marco del SEIA, las capacidades técnicas ya están desarrolladas. Del mismo modo, no se requeriría generar herramientas metodológicas ni contar con información ambiental adicional a la actualmente disponible.

6.8 Recomendaciones adicionales

A partir de la revisión y análisis realizado en la presente consultoría, a continuación, se presentan algunas recomendaciones adicionales, fuera del objetivo de la consultoría, propuestas por el equipo consultor.

La revisión de los DIAs y EIAs aprobados en zonas saturadas dio cuenta de que no existe una estandarización de la información de modelación de calidad del aire entregada en estos informes. Por esto se recomienda que la modelación del impacto en la calidad del aire debe realizarse tanto para el punto de máximo impacto como para la población que se encuentre en el área de influencia. Esto se debe a que en algunos proyectos solo modelaban el incremento en el punto máximo de impacto, el cual correspondía a un punto no poblado y no evaluaban el impacto en zonas que podría existir un incremento menor pero suficiente para causar un impacto sobre la salud de un poblado cercano.

Debido a que se usaron solo diez estaciones de monitoreo para la evaluación de los SILs a partir del registro de calidad del aire del SINCA con la metodología de la USEPA —en el contexto de que esta consultoría tenía por objetivo la recopilación de criterios existentes replicables, y no su

elaboración—, se recomienda ampliar y/o editar la selección de las estaciones de monitoreo nacionales analizadas para robustecer los valores obtenidos a través de método y así tener valores más representativos, tanto para cada zona como en el valor ponderado total.

Otro aspecto muy relevante que se debería incorporar en la evaluación de proyectos en el marco del SEIA es que los planes de compensación de los proyectos que no cumplen lo establecido en el PPDA o generan un impacto significativo en la salud, se deberían implementar en la zona de influencia del proyecto, de modo que los beneficios sean percibidos por la misma población afectada por su operación. Esto se sustenta en que los contaminantes normados con normas primarias de calidad del aire son principalmente contaminantes locales, que afectan a las poblaciones cercanas a la zona de emplazamiento del proyecto. Adicionalmente, para verificar que el plan de compensación cumple con el objetivo de reducir el neto de las emisiones, se debería incluir y evaluar el efecto de este plan en la modelación del impacto del proyecto en la calidad del aire, de modo de evaluar si este plan cumpliese con su objetivo o no.

Finalmente, en la revisión de los proyectos aprobados en zonas saturadas se observó que de 45 proyectos revisados que incluyen modelación, 10 proyectos utilizaron un modelo “Screening” que no es recomendado por el SEA. Por esto se recomienda tener precaución en la evaluación de verificar que el modelo que se utilice para la modelación de calidad del aire sea el adecuado, especialmente cuando se trata de zonas saturadas o latentes por contaminantes atmosféricos, donde el componente de calidad del aire es más vulnerable.

7. Conclusiones

En la revisión de la normativa internacional en búsqueda de criterios de evaluación de la significancia del efecto de contaminantes atmosféricos en zonas saturadas o en estado de saturación en el marco de la evaluación ambiental o tramitación de permisos ambientales de proyectos o actividades realizada, se buscó identificar este tipo de criterios en la documentación de, a lo menos, los Estados indicados en el artículo 11° del RSEIA.

De esta revisión fue posible identificar criterios para EE.UU., el Reino Unido, la Unión Europea, Países Bajos, Nueva Zelanda y Australia. En EE.UU. se utiliza el concepto de fuente de gran magnitud, modificación importante y SILs. Los dos primeros se refieren a las características de una fuente sometida a los requerimientos establecidos en el programa NSR, aplicable en zonas de incumplimiento, mientras que un SIL se refiere a una concentración de contaminante bajo la cual su aporte no es considerado significativo y se aplica a zonas en cumplimiento con la normativa estadounidense.

En el Reino Unido, se identificó que, para Inglaterra, cuando se estima que una fuente emisora contribuirá a que se supere la norma en un área o ya está siendo superada, existe la opción de elaborar un ACB con el fin de demostrar a la autoridad competente que los beneficios del proyecto superan a los costos. Adicionalmente, para Gales e Inglaterra, se identificó un criterio de evaluación de impacto, que varía de acuerdo con el nivel de evaluación de calidad del aire y la concentración promedio a la que se expone el receptor, expresado como un porcentaje del mismo nivel.

En la Unión Europea, se identificaron criterios de carácter cualitativo cuya idea basal es que la significancia de un impacto depende de la sensibilidad del receptor y de la magnitud del cambio, que, a su vez, está sujeto a factores como la duración, la intensidad y la extensión espacial.

En Países Bajos, se identificó que existe un decreto que establece el valor que se considera como una contribución no significativa de MP_{10} y NO_2 de proyectos del tipo locales comerciales, infraestructura, edificios de oficina o residenciales. Este valor corresponde al 3% del límite de la norma de calidad del aire para dichos contaminantes, correspondiente a un incremento de 1,5 y 1,2 µg/m^3 en la concentración diaria y anual de MP_{10}, y a un incremento en 6,0 y 1,2 µg/m^3 en la concentración horaria y anual de NO_2.

En Nueva Zelanda se identificó solo un criterio para el caso del MP_{10}, cuya tasa de emisión no podrá causar un incremento de más de 2,5 µg/m^3 en las cercanías de una zona contaminada. En el caso del resto de los contaminantes normados por la legislación neozelandesa, no se declaran márgenes de tolerancia de superación del estándar de calidad.

En Australia se identificó un documento preparado para el estado New South Wales en el que se propone un procedimiento para evaluar los impactos del aumento de la concentración de ozono

por causa de fuentes estacionarias. Se establecen diferentes valores de los umbrales de emisiones e incrementos máximos permitidos entre zonas saturadas y no saturadas. En el caso de zonas saturadas se establece un valor de 0,5 ppb como incremento no significativo y un valor de 1 ppb como incremento máximo permitido.

Cabe destacar que se encontraron criterios aplicables para todos los contaminantes atmosféricos normados en Chile, a excepción del plomo.

Si bien en la reunión de revisión de los criterios con el equipo técnico del SEA se presentó una propuesta preliminar de criterios para ser incorporados en el marco de evaluación del SEIA —asociada a la actividad 4 del objetivo específico 1—, de acuerdo con la conversación sostenida en dicha reunión se acordó que debía trabajarse en mayor profundidad los criterios identificados antes de tener una propuesta definitiva. En particular, se acordó abordar el análisis por medio del método de evaluación del riesgo incremental, para lo cual fue necesario profundizar en la recopilación y revisión de literatura referente a estudios nacionales e internacionales en el ámbito de la toxicología, epidemiologia y ensayos clínicos respecto a los efectos sobre la salud de las personas de los contaminantes indicados en las normas primarias de calidad del aire vigentes a nivel nacional.

En particular, el levantamiento de antecedentes permitió recopilar valores para dos factores principales de la ecuación de riesgo relativo: el coeficiente de riesgo unitario (beta), obtenido a partir de estudios epidemiológicos, y el riesgo aceptable.

En la Tabla 7-1 se detallan los efectos para los cuales se identificaron betas (β) para diferentes contaminantes. Los betas recolectados provienen de un estudio nacional, desarrollado por Cifuentes (2000), y de diferentes estudios internacionales, los cuales son principalmente de EE.UU. y Canadá.

Tabla 7-1 Resumen de los tipos de efectos, efectos y contaminantes para los cuales se tiene algún registro de coeficiente de riesgo unitario (β)

Tipo Efecto	Efecto	Contaminantes
Mortalidad Prematura Largo Plazo	Mortalidad Prematura	MP_{10}, $MP_{2,5}$
Mortalidad Prematura Corto Plazo	Mortalidad Prematura	MP_{10}, $MP_{2,5}$, CO, O_3
Acciones Médicas	Admisiones Hospitalarias	$MP_{2,5}$, NO_2, SO_2, CO, O_3
	Visitas Salas Emergencia	$MP_{2,5}$, O_3
Restricción actividad	WLD	$MP_{2,5}$
	RAD	$MP_{2,5}$
	MRAD	$MP_{2,5}$, NO_2, O_3,
	SLD	O_3
	EA	NO_2

Fuente: Elaboración propia

Mientras que en la Tabla 7-2 se resumen los riesgos aceptables identificados, reportados en Francia, Países Bajos, EE.UU. y Australia.

Tabla 7-2 Resumen de recopilación de riesgos aceptables

Clasificación	Nivel de riesgo	Aplicación	País	Fuente
Riesgo aceptable	QD < 1 ERI < 10^{-5}	Sustancias tóxicas y cancerígenas	Francia	(Institut national de l'environnement industriel et des risques, 2013)
Riesgo aceptable	10^{-6}	Sustancias cancerígenas	Países Bajos	(Tweede Kamer der Staten-Generaal, 1988)
Riesgo aceptable	10^{-6}	Para diferentes establecimientos		(Ministerie van Volkshuisvesting, 2004)
Riesgo aceptable*	$R_L = 0{,}015\ P^{-0,5}$	Sustancias cancerígenas	Estados Unidos	(Whipple, 1988)
Riesgo aceptable	10^{-5}	Sustancias cancerígenas	Australia	(Environmental Health Standing Committee (enHealth), 2012)

(*) No se explicita con el término "aceptable", pero se análoga de acuerdo con su descripción y uso.

Fuente: Elaboración propia

El resultado de esta compilación constituye un insumo para la definición de la evaluación de una posible recomendación de criterios definitiva desarrollada. En la Tabla 7-3 se observan los resultados que se calcularon a partir de la recopilación, los cuales son incrementos bajos al compararlos con el límite de la normativa, ya que son entre un 0,001% y un 0,007% de los valores de las NPCA. Debido a la complejidad política que constituye determinar un riesgo aceptable y los bajos valores de concentración que resultan al aplicar el método de evaluación del riesgo incremental, en acuerdo con la contraparte, no se incorporaron estos criterios a la recomendación final de esta consultoría.

Tabla 7-3 Incremento de concentración aceptable a partir de estudios de afectación a la salud

Fuente	Métrica	Contaminante	β	$\Delta C_1(\Delta RR = 10^{-5})$ [µg/m^3]	ΔC_2 ($\Delta RR = 10^{-6}$) [µg/m^3]
Guía AGIES	**Anual**	**$MP_{2,5}$**	0,00940	0,00106	0,00011
GreenLab, 2018	**24 horas**	**$MP_{2,5}$**	0,00131	0,00763	0,00076
WHO 2021	**Anual**	**MP_{10}**	0,01133	0,00088	0,00009
WHO 2021	**24 horas**	**MP_{10}**	0,00091	0,01104	0,00110
GreenLab, 2018	**Máxima 8h**	**O_3**	0,00450	0,00222	0,00022
Guía AGIES	**24 horas**	**SO_2**	0,01100	0,00091	0,00009
WHO 2021	**24 horas***	**CO**	0,00005	0,18353	0,01835

Fuente: Elaboración propia

En cuanto a la revisión de los últimos dos años de evaluación ambiental en las zonas geográficas que se han declarados saturadas a lo largo de Chile. Este análisis comprendió la recopilación y revisión de los proyectos aprobados entre el 2019 y 2020 en dichas zonas.

Una vez identificadas las zonas declaradas saturadas por la superación de alguna NPCA, se sistematizaron los proyectos aprobados entre el 2019 y 2020 en dichas zonas. En total se revisaron 167 proyectos, incluyendo EIA y DIA, dentro de los cuales solo 45 modelaron el impacto en la calidad del aire de sus emisiones.

Se hizo una revisión respecto a los criterios para definir si el impacto es o no significativo. En esta revisión se identificó que los criterios utilizados para determinar la significancia del impacto no presentan un trasfondo y/o justificación fundamentada, y que en la gran mayoría de los casos se limita al cumplimiento del mínimo exigido o a la compensación de acuerdo con lo requerido en los PDA o PPDA. Por lo anterior, no se identifican criterios replicables a partir de esta revisión.

Se realizó una reunión con la contraparte técnica del SEIA en la que se presentaron las posibles recomendaciones de criterios, así como una propuesta preliminar —asociada a la actividad 1 del objetivo específico 4—. En esta reunión se acordó profundizar la metodología del cálculo de los valores de los niveles de impacto significativos de la USEPA, para calcular estos valores utilizando la base de datos de la red de monitoreo chilena de calidad del aire (SINCA), y así comparar estos resultados, como insumo para la definición de la recomendación definitiva. Para aplicar la metodología, el equipo experto escogió 10 estaciones de monitoreo de calidad del aire. Los resultados de los niveles de impacto significativos porcentuales obtenidos a partir de la metodología de la USEPA y los valores establecidos por la USEPA para EE.UU. se muestran en la Tabla 7-4. En general, los valores de los niveles de impacto significativos porcentuales de la USEPA son mayores a los valores obtenidos con los datos de la red de monitoreo de calidad del aire chilena.

Tabla 7-4 Resumen SILs USEPA y estimados para Chile

Contaminante	Periodo	SIL porcentual USEPA	SIL porcentual estimado a partir de datos del SINCA	Diferencia entre SIL porcentual estimado y SIL porcentual USEPA
$MP_{2,5}$	24 horas	3,4%	2,7%	-0,8%
	anual	1,7%	1,3%	-0,4%
MP_{10}	24 horas	3,3%	2,7%	-0,6%
	anual	2,0%	1,2%	-0,8%
O_3	8 horas	1,4%	1,9%	0,5%
NO_2	1 hora	4,0%	2,2%	-1,8%
	anual	1,0%	0,7%	-0,3%
CO	1 hora	5,0%	3,4%	-1,6%
	8 horas	4,9%	3,1%	-1,8%
SO_2	1 hora	4,0%	6,9%	2,9%
	24 horas	1,4%	4,7%	3,4%
	anual	2,0%	1,5%	-0,5%

Fuente: Elaboración propia

A partir de los resultados presentados, se selecciona como recomendación definitiva utilizar los valores de SIL y límites definidos por la USEPA para el incremento en la concentración de contaminantes atmosféricos, destacados en letra negrita en la Tabla 7-4. Lo anterior se debe a múltiples motivos, entre los que destacan:

- En la gran mayoría de los casos, el SIL estimado con datos de monitoreo de Chile es cercano al definido por la USEPA, con diferencias absolutas menores a 2%, a excepción del SO_2 de 1 hora y 24 horas, que tiene una diferencia de 2,9% y 3,4%, respectivamente.

- Los valores de SILs de la USEPA fueron obtenidos a partir de una muestra mayor y más variada de estaciones de monitores.
- Del mismo modo, la variabilidad de la calidad del aire podría cambiar en el futuro, de modo que se generaría la necesidad de replicar el cálculo con cierta frecuencia, con la consiguiente exigencia en tiempo y recursos de esta tarea.
- Los valores definidos por la USEPA tienen el respaldo de esta institución, de las principales y más reconocidas de las que han abordado este tipo de criterios, de acuerdo con la revisión de literatura realizada.
- Por último, según juicio experto, se recomiendan valores a nivel nacional debido a que es políticamente complejo definir diferentes niveles para diferentes zonas geográficas nacionales, porque implícitamente se estaría aceptando exponer a la población a diferentes niveles de riesgo.

Mientras que, en el caso del plomo, si bien es un contaminante para el cual existe una NPCA, no se determinan criterios replicables recomendables, dado que el valor límite de este contaminante está relacionado con un umbral aceptable y acordado de pérdida de IQ en niños, es decir, tiene un umbral definido, a diferencia de los otros contaminantes analizados en esta consultoría. Por lo que no se proponen criterios de límite de incremento significativo.

En síntesis, en la Tabla 7-5 se presentan los criterios recomendados aplicables en el marco del SEIA, al momento de evaluar la significancia del impacto de emisiones atmosféricas (magnitud, duración y extensión) de contaminantes normados generados por proyectos o actividades emplazados en zonas saturadas o en estado de saturación sobre el riesgo para la salud de la población.

Tabla 7-5 Criterios recomendados de incremento significativo en la concentración de contaminantes atmosféricos en zonas saturadas

Contaminante	Periodo	SIL porcentual USEPA [%]	Incremento significativo en la concentración [µg/m³]
$MP_{2,5}$	24 horas	3,4%	1,7
	Anual	1,7%	0,3
MP_{10}	24 horas	3,3%	5,0
	Anual	2,0%	1,0
O_3	8 horas	1,4%	1,7
NO_2	1 hora	4,0%	16,0
	Anual	1,0%	1,0
CO	1 hora	5,0%	1500,0
	8 horas	4,9%	488,9
SO_2	1 hora	4,0%	14,0
	24 horas	1,4%	2,0
	Anual	2,0%	1,2
Pb	Anual	Sin recomendación	Sin recomendación

Fuente: Elaboración propia

8. Bibliografía

Adrien Lantieri, Zuzana Lukacova, Jennifer McGuinn, and A. M. (2017). *Environmental Impact Assessment of Projects: Guidance on the preparation of the Environmental Impact Assessment Report*. https://ec.europa.eu/environment/eia/pdf/EIA_guidance_EIA_report_final.pdf

AEP. (2021). *California Environmental Quality Act: Statute and Guidelines*. http://ccr.oal.ca.gov/,

Agency for Toxic Substances and Disease Registry. (2009). *Glossary of Terms*.

Air Quality Permit Section, Air Quality Division, & Arizona Department of Environmental Quality. (2015). *Air Dispersion Modeling Guidelines for Arizona Air Quality Permits*.

Beelen, R., Raaschou-Nielsen, O., Stafoggia, M., Andersen, Z. J., Weinmayr, G., Hoffmann, B., Wolf, K., Samoli, E., Fischer, P., Nieuwenhuijsen, M., Vineis, P., Xun, W. W., Katsouyanni, K., Dimakopoulou, K., Oudin, A., Forsberg, B., Modig, L., Havulinna, A. S., Lanki, T., … Hoek, G. (2014). Effects of long-term exposure to air pollution on natural-cause mortality: An analysis of 22 European cohorts within the multicentre ESCAPE project. *The Lancet*, *383*(9919), 785–795. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(13)62158-3

Chen, J., & Hoek, G. (2020). Long-term exposure to PM and all-cause and cause-specific mortality: A systematic review and meta-analysis. *Environment International*, *143*(June), 105974. https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105974

Cifuentes, L. A., Vega, J., Kopfer, K., & Lave, L. B. (2000). Effect of the fine fraction of particulate matter versus the coarse mass and other pollutants on daily mortality in Santiago, Chile. *J Air Waste Manag Assoc*, *50*(8), 1287-98. http://www.ncbi.nlm.nih.gov/htbin-post/Entrez/query?db=m&form=6&dopt=r&uid=11002592

Dockery, D. W., Pope III, C. A., Xu, X., Spengler, J. D., Ware, J. H., Fay, M. E., Ferris Jr., B. G., & Speizer, F. E. (1993). An association between air pollution and mortality in Six U.S. Cities. *The New England Journal of Medicine*, *329*, 1753–1759.

EA. (n.d.). *Environment Agency: About Us*. Retrieved December 17, 2021, from https://www.gov.uk/government/organisations/environment-agency/about

EA. (2015). *Cost-benefit assessment for combustion installations*. www.environment-agency.gov.uk

EA. (2020a). *Check if you need an environmental permit*. https://www.gov.uk/guidance/check-if-you-need-an-environmental-permit

EA. (2020b). *IED derogation cost-benefit analysis tool: user guide*.

EA. (2021). *Risk assessments for your environmental permit*. *2016*. https://www.gov.uk/guidance/risk-assessments-for-your-environmental-permit

EA, & DEFRA. (2021). *Air emissions risk assessment for your environmental permit*. *2016*.

ENVIRON Australia Pty Ltd. (2011). *Tiered Procedure for Estimating Ground-Level Ozone Impacts from Stationary Sources*.

Environmental Health Standing Committee (enHealth). (2012). *Environmental Health Risk Assessment. Guidelines for assessing human health risks from environmental hazards.*

EPUK & IAQM. (2017). *Development Control : Planning For Air Quality*. *2015*(May), 1–33.

European Parliament. (2012). *Directive 2012/27/EU*.

George, A., Stead, T. S., & Ganti, L. (2020). What's the Risk: Differentiating Risk Ratios, Odds Ratios, and Hazard Ratios? *Cureus*, *12*(8). https://doi.org/10.7759/cureus.10047

Governor's Office of Planning and Research. (n.d.). *CEQA: The California Environmental Quality Act*. Retrieved December 27, 2021, from https://opr.ca.gov/ceqa/

GreenLab. (2018). *Estudio de metodologías para la evaluación de normas de calidad y complemento a estimación de beneficios en salud derivados de la contaminación atmosférica*.

GreenLab. (2020). *Actualización de tasas de incidencia base de mortalidad y morbilidad para contaminación atmosférica y creación de un modelo automático para la actualización*. http://catalogador.mma.gob.cl:8080/geonetwork/srv/spa/resources.get?uuid=8484a611-8fa9-4695-acea-c847e7b828c0&fname=200221-ATICA2-InformeFinal.pdf&access=public

GreenLabUC. (2011). *Guía Metodológica para la Elaboración de un Análisis General de Impacto Económico y Social (AGIES) para Instrumentos de Gestión de Calidad del Aire* (Estudio encargado por el Ministerio de Medio Ambiente (ed.)).

IAQM. (n.d.). *IAQM*.

IMPERIA Project. (2015). *Guidelines for the systematic impact significance assessment – The ARVI approach*. https://jyx.jyu.fi/bitstream/handle/123456789/49498/Guidelines_for_impact_significance_assessment.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Institut national de l'environnement industriel et des risques. (2013). *Évaluation De L ' État Des Milieux Et Des Risques Sanitaires*.

Jorquera, H. (2015). Capítulo 2 Contaminantes atmosféricos y salud de la población. In *Introducción a la contaminación atmosférica* (pp. 59–110). Ediciones UC.

Kansas Department of Health and Environment, & Bureau of Air- Modeling Group. (2016). *Significant Impact Levels (SILs), National Ambient Air Quality Standards (NAAQS), PSD Class II Increments, and Significant Monitoring Concentrations for Criteria Pollutants*.

Lee, K. K., Spath, N., Miller, M. R., Mills, N. L., & Shah, A. S. V. (2020). Short-term exposure to carbon monoxide and myocardial infarction: A systematic review and meta-analysis. *Environment International*, *143*(April), 105901. https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105901

Milvy, P. (1987). Towards an Acceptable Criterion of Acceptable Risk. In *Risk Assessment and Management* (pp. 619–631).

Minister van Infrastructuur en Waterstaat. (n.d.). *Niet in betekenende mate (NIBM)*. Kenniscentrum InfoMil. https://www.infomil.nl/onderwerpen/lucht-water/luchtkwaliteit/regelgeving/wet-milieubeheer/nibm/

Besluit niet in betekenende mate bijdragen (luchtkwaliteitseisen), (2012). https://wetten.overheid.nl/BWBR0022815/2012-06-20

Ministerie van Volkshuisvesting, R. O. en M. (2004). *Besluit van 27 mei 2004, houdende milieukwaliteitseisen voor externe veiligheid van inrichtingen milieubeheer (Besluit externe veiligheid inrichtingen)*. https://zoek.officielebekendmakingen.nl/stb-2004-250.html

Minnesota Pollution Control Agency. (2021). *MPCA Air Dispersion Modeling Practices*. www.pca.state.mn.us.

MINSEGPRES; CONAMA. (1998). DS N°59 - ESTABLECE NORMA DE CALIDAD PRIMARIA PARA

MATERIAL PARTICULADO RESPIRABLE MP10, EN ESPECIAL DE LOS VALORES QUE DEFINEN SITUACIONES DE EMERGENCIA. In *Decreto* (Vol. 59). https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=99434

MINSEGPRES. (2002a). DS Nº114 - ESTABLECE NORMA PRIMARIA DE CALIDAD DE AIRE PARA DIOXIDO DE NITROGENO (NO2). In *Decreto* (Vol. 114). https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=208185

MINSEGPRES. (2002b). *DS Nº115 - ESTABLECE NORMA PRIMARIA DE CALIDAD DE AIRE PARA MONOXIDO DE CARBONO (CO)*. https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=202437

MINSEGPRES. (2003). *DS Nº112 - ESTABLECE NORMA PRIMARIA DE CALIDAD DE AIRE PARA OZONO (O3)*. https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=208198

MMA. (2011). *DS Nº12 - Establece Norma Primaria de Calidad Ambiental para Material Particulado Fino Respirables MP 2,5* (M. del M. Ambiente (ed.)).

MMA. (2015). *Guía metodológica para la elaboración de un AGIES para instrumentos de gestión de calidad del aire*.

MMA. (2019). DS Nº104 - ESTABLECE NORMA PRIMARIA DE CALIDAD DE AIRE PARA DIÓXIDO DE AZUFRE (SO2). In *Decreto* (Vol. 104). https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1131641&idParte=

National Environment Protection Council (NEPC). (2010). *National Environment Protection Measure. Schedule 4. Guideline on Health Risk Assessment Methodology.*

Nevada Division of Environmental Protection. (n.d.). *Policy for Significant Impact Levels (SILs) Analysis for Air Quality Impact Assessment*. https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-07/documents/appwso2.pdf

Protection of the Environment Operations Act, Pub. L. No. 156 (1997).

Orellano, P., Reynoso, J., Quaranta, N., Bardach, A., & Ciapponi, A. (2020). Short-term exposure to particulate matter (PM10 and PM2.5), nitrogen dioxide (NO2), and ozone (O3) and all-cause and cause-specific mortality: Systematic review and meta-analysis. *Environment International*, *142*(June), 105876. https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105876

Permit Modeling Unit, Regulatory Development and Complex Sources Section, Air Permitting Program, & Air Pollution Control Division. (2019). *Tennessee Guidance on the Use of EPA's MERPs to Account for Secondary Ozone and Fine Particulate Formation in Tennessee Under the New Source Review (NSR) Prevention of Significant Deterioration Program (PSD)*. https://www.epa.gov/scram/clean-air-act-permit-modeling-guidance

Pope, C. A., Coleman, N., Pond, Z. A., & Burnett, R. T. (2020). Fine particulate air pollution and human mortality: 25+ years of cohort studies. *Environmental Research*, *183*(November 2019), 108924. https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.108924

Pope, C. A., Thun, M. J., Namboodiri, M. M., Dockery, D. W., Evans, J. S., Speizer, F. E., & Heath, C. W. (1995). Particulate Air Pollution as a Predirtor of Mortality in a Prospertive Study of U.S. Adults. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, *151*(3_pt_1), 669–674. https://www.atsjournals.org/doi/abs/10.1164/ajrccm/151.3_Pt_1.669

Pope III, C. A., Burnet, R. T., Thun, M. J., Calle, E. E., Krewski, D., Ito, K., Thurston, G. D., Pope 3rd, C. A., & Burnett, R. T. (2002). Lung Cancer, Cardiopulmonary Mortality, and Long-term Exposure to Fine Particulate Air Pollution. *Jama*, *287*(9), 1132–1141. http://www.ncbi.nlm.nih.gov/entrez/query.fcgi?cmd=Retrieve&db=PubMed&dopt=Citatio

n&list_uids=11879110
SEA. (2012a). *Guía de evaluación de impacto ambiental: Riesgo para la salud de la población*. https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004
SEA. (2012b). *Guia para el Uso de Modelos de Calidad del Aire en el SEIA*.
SECTRA. (2012). *ANÁLISIS METODOLÓGICO PARA LA APLICACIÓN DEL MODELO MODEC EN REGIONES, ETAPA II*.
Texas Commission on Environmental Quality. (2019). *Air Quality Modeling Guidelines*. https://www.tceq.texas.gov/assets/public/permitting/air/Modeling/guidance/airquality-mod-guidelines6232.pdf
Tweede Kamer der Staten-Generaal. (1988). *Nationaal milieubeleidsplan,Omgaan met risico's* (pp. 1–28).
U.S. Environmental Protection Agency. (2020). Review of the National Ambient Air Quality Standards for Particulate Matter. *Federal Register*, *85*(244), 82684–82748. https://www.govinfo.gov/content/pkg/FR-2020-12-18/pdf/2020-27125.pdf
UK Government. (2016). *The environmental Permitting (England and Wales) Regulations 2016*. https://www.legislation.gov.uk/uksi/2016/1154/contents/made
US-EPA. (2016). *40 CFR Appendix U to Part 50 - Interpretation of the Primary and Secondary National Ambient Air Quality Standards for Ozone*. https://www.law.cornell.edu/cfr/text/40/appendix-U_to_part_50
US-EPA. (2021). *40 CFR Appendix N to Part 50 - Interpretation of the National Ambient Air Quality Standards for PM2.5*.
US Environmental Protection Agency. (2006). *Air Quality Criteria for Lead*.
US Environmental Protection Agency. (2007). *Review of the National Ambient Air Quality for Lead: Policy Assesment of Scientific and Technical Information, OAQPS Staff Paper*.
US Environmental Protection Agency. (2008). National Ambient Air Quality Standards for Lead. *Federal Register*, *73*(219), 66964–67062.
USEPA. (n.d.-a). *Área de clase I*.
USEPA. (n.d.-b). *Área de clase II*.
USEPA. (n.d.-c). *Área de clase III*. https://www.epa.gov/scram/clean-air-act-permit-modeling-guidance
USEPA. (n.d.-d). *Información NAAQS*. https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naaqs-table
USEPA. (n.d.-e). *Ley de Aire Limpio*. https://www.epa.gov/laws-regulations/summary-clean-air-act
USEPA. (n.d.-f). *Nonattainment NSR Basic Information*. Retrieved December 20, 2021, from https://www.epa.gov/nsr/nonattainment-nsr-basic-information
USEPA. (n.d.-g). *NRS información básica*. https://www.epa.gov/nsr/learn-about-new-source-review
USEPA. (n.d.-h). *Ozone Designation and Classification Information*. Retrieved December 20, 2021, from https://www.epa.gov/green-book/ozone-designation-and-classification-information
USEPA. (n.d.-i). *PSD información básica*.
USEPA. (2011). *40 CFR 51.165 Permit requirements*.
USEPA. (2018a). Guidance on Significant Impact Levels for Ozone and Fine Particles in the Prevention of Significant Deterioration Permitting Program. *Angewandte Chemie*

International Edition, 6(11), 951–952., 20.

USEPA. (2018b). *Legal Memorandum Application of Significant Impact Levels in the Air Quality Demonstration for Prevention of Significant Deterioration Permitting under the Clean Air Act*. *165*(3), 1–14.

USEPA. (2018c). *Technical Basis for the EPA's Development of the Significant Impact Thresholds for PM 2.5 and Ozone*. https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/P100P2AK.TXT?ZyActionD=ZyDocument&Technical Basis for the EPA%27s Development of the Significant Impact Thresholds for PM2.5 and OzoneClient=EPA&Index=2016+Thru+2020&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestric

Whipple, C. (1988). Acceptable Risk. In *Carcinogen Risk Assessment.* (pp. 157–170). Springer.

WHO. (2021a). *WHO global air quality guidelines. Particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide.*

WHO. (2021b). *WHO global air quality guidelines*. https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329

9. Anexos

9.1 Anexo 1: Descriptores de impacto sobre receptores individuales, guía de EPUK y IAQM

En la siguiente figura se presentan los descriptores del impacto sobre receptores individuales presentados en la guía "Land-Use Planning & Development Control: Planning For Air Quality" (USEPA, 2018a).

Table 6.3: Impact descriptors for individual receptors.

Long term average Concentration at receptor in assessment year	% Change in concentration relative to Air Quality Assessment Level (AQAL)			
	1	2-5	6-10	>10
75% or less of AQAL	Negligible	Negligible	Slight	Moderate
76-94% of AQAL	Negligible	Slight	Moderate	Moderate
95-102% of AQAL	Slight	Moderate	Moderate	Substantial
103-109% of AQAL	Moderate	Moderate	Substantial	Substantial
110% or more of AQAL	Moderate	Substantial	Substantial	Substantial

Explanation

1. AQAL = Air Quality Assessment Level, which may be an air quality objective, EU limit or target value, or an Environment Agency 'Environmental Assessment Level (EAL)'.
2. The Table is intended to be used by rounding the change in percentage pollutant concentration to whole numbers, which then makes it clearer which cell the impact falls within. The user is encouraged to treat the numbers with recognition of their likely accuracy and not assume a false level of precision. Changes of 0%, i.e. less than 0.5%, will be described as Negligible.
3. The Table is only designed to be used with annual mean concentrations.
4. Descriptors for individual receptors only; the overall significance is determined using professional judgement (see Chapter 7). For example, a 'moderate' adverse impact at one receptor may not mean that the overall impact has a significant effect. Other factors need to be considered.
5. When defining the concentration as a percentage of the AQAL, use the 'without scheme' concentration where there is a decrease in pollutant concentration and the 'with scheme;' concentration for an increase.
6. The total concentration categories reflect the degree of potential harm by reference to the AQAL value. At exposure less than 75% of this value, i.e. well below, the degree of harm is likely to be small. As the exposure approaches and exceeds the AQAL, the degree of harm increases. This change naturally becomes more important when the result is an exposure that is approximately equal to, or greater than the AQAL.
7. It is unwise to ascribe too much accuracy to incremental changes or background concentrations, and this is especially important when total concentrations are close to the AQAL. For a given year in the future, it is impossible to define the new total concentration without recognising the inherent uncertainty, which is why there is a category that has a range around the AQAL, rather than being exactly equal to it.

Figura 9-1 Descriptores del impacto sobre receptores individuales
Fuente: (EPUK & IAQM, 2017b), Tabla 6.3

9.2 Anexo 2: Ejemplos de aplicación de la doble definición de fuente en el Clean Air Act

A continuación, se muestran dos ejemplos contenidos en el *NSR Workshop Manual* (USEPA, 1990) para ilustrar la aplicación de la doble definición a una fuente estacionaria. Cabe aclarar que estos ejemplos eran válidos en 1990, fecha de elaboración de dicho manual, cuando una fuente de gran magnitud se definía como aquella cuyo potencial de emisión era de 100 toneladas por año o más, y la tasa de emisión significativa para el NO_X era de 40 toneladas al año o más.

Ejemplo 1:

Una fuente estacionaria de gran magnitud se localiza en un área de incumplimiento para NO_X. Cuenta con las siguientes unidades de emisión:

Unidad 1: con potencial de emisión de 120 ton/año de NO_X.
Unidad 2: con potencial de emisión de 80 ton/año de NO_X.
Unidad 3: con potencial de emisión de 120 ton/año de NO_X.
Unidad 4: con potencial de emisión de 130 ton/año de NO_X.

Caso 1: se planea una modificación en la Unidad 1 que resultaría en un aumento de las emisiones en 45 ton/año. Los siguientes cambios en las emisiones ocurren contemporáneamente.

Unidad 3: tuvo una disminución de emisiones de 10 ton/año.
Unidad 4: tuvo una disminución de emisiones de 10 ton/año.

Respuesta: como la Unidad 1 por sí sola es una fuente de gran magnitud, la reducción de las unidades 3 y 4 no se consideran. El incremento de 45 ton/año es mayor a la tasa de emisión significativa vigente para el NO_X, de 40 ton/año. Consecuentemente, la modificación propuesta es de gran magnitud.

Caso 2: una modificación en la Unidad 2 resulta en el incremento de las emisiones en 45 ton/año. Los siguientes cambios en las emisiones ocurren contemporáneamente.

Unidad 1: tuvo una disminución de emisiones de 10 ton/año.
Unidad 3: tuvo una disminución de emisiones de 10 ton/año.

Respuesta: como la Unidad 2 no es una fuente de gran magnitud (80 ton/año < 100 ton/año), la reducción en las emisiones de las Unidades 1 y 3 sí son consideradas, y la emisión neta es de 25 ton/año. Consecuentemente, la modificación propuesta no es de gran magnitud.

Caso 3: se desea instalar una nueva Unidad 5 con el potencial de emitir 45 ton/año. Los siguientes cambios en las emisiones ocurren contemporáneamente.

Unidad 1 tuvo una disminución de emisiones de 15 ton/año.

Unidad 2 tuvo un aumento de emisiones de 25 ton/año.
Unidad 3 tuvo una disminución de emisiones de 20 ton/año.

Respuesta: como la nueva Unidad 5 no es una fuente de gran magnitud por sí sola, el cambio en las Unidades 1, 2 y 3 son consideradas en el cálculo neto de las emisiones, que se traduce en 35 ton/año, que es menor a 40 ton/año (la tasa de emisión significativa vigente para el NO_X). Por ende, la unidad nueva propuesta no representa una modificación de gran magnitud.

Ejemplo 2:

Una planta tiene dos unidades de emisión, con el potencial de emitir 25 ton/año y 40 ton/año. En este caso, cualquier modificación a la planta debería tener un potencial para emitir más de 100 ton/año antes de que la modificación sea de gran magnitud y esté sujeta a revisión. Esto porque, ni las fuentes por sí solas o en su conjunto son consideradas como una fuente de gran magnitud.

9.3 Anexo 3: Diagrama de procedimiento propuesto para la evaluación del impacto del ozono de fuentes nuevas o modificadas

El siguiente diagrama presenta los niveles que considera este procedimiento. Además, se detallan las evaluaciones consideradas dentro de cada nivel.

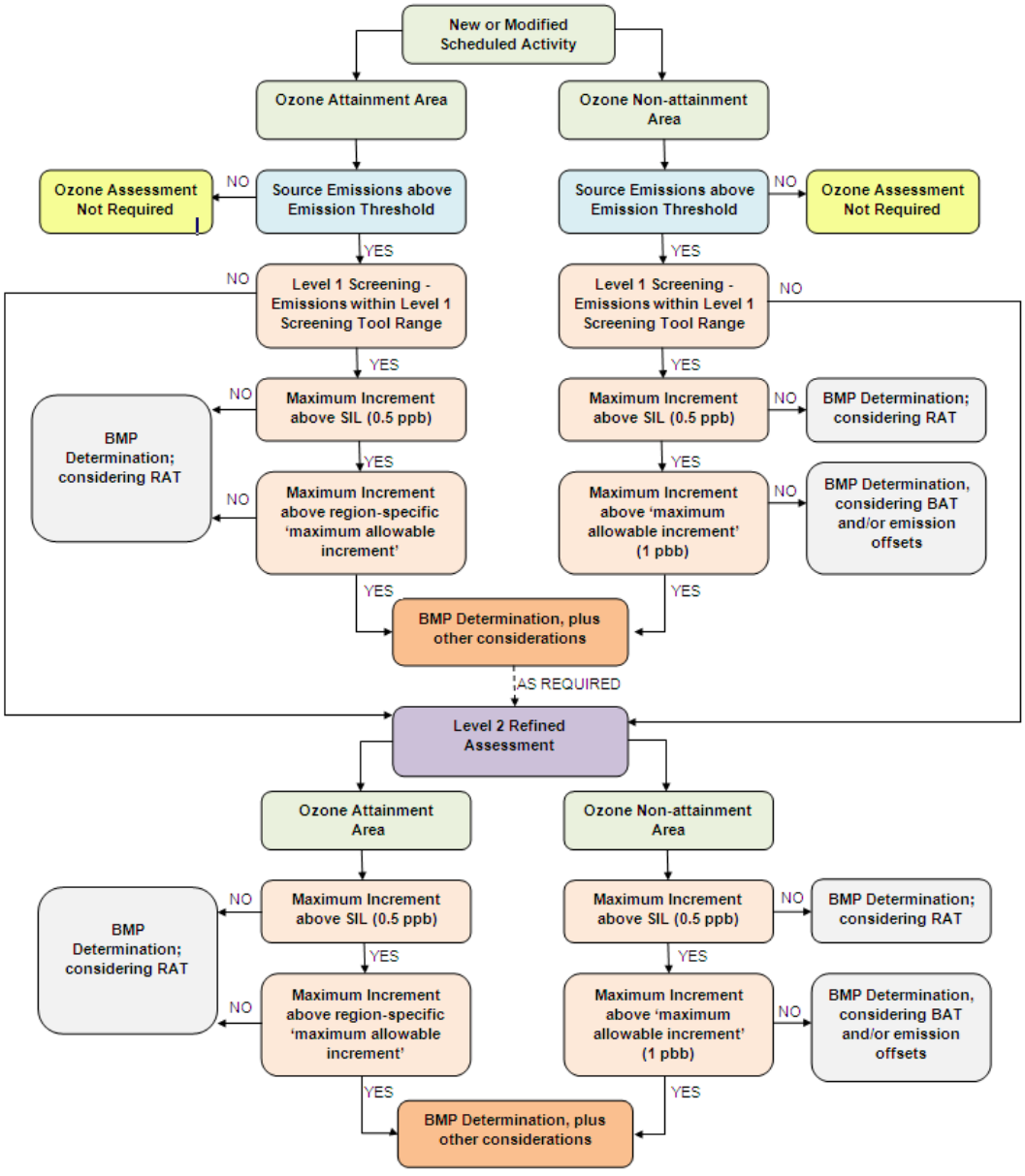


Figura 9-2 Procedimiento de evaluación de los impactos del ozono de fuentes nuevas o modificadas en el Gran Área Metropolitana de New South Wales, Australia
Fuente: (ENVIRON Australia Pty Ltd, 2011)

9.4 Anexo 4: Umbrales de emisión para NO_X y COV (NSW, Australia).

En las siguientes tablas se presentan los umbrales de emisiones establecidos para los contaminantes NOx y COV, que son precursores del O_3.

Tabla 9-1 Umbrales de emisión de NOx y COV para fuentes estacionarias en zonas no saturadas [ton/año]

Tipo de Fuente	Tasa de emisión de NOx/COV [ton/año]
Nueva fuente	
Cualquier actividad programada que este mencionada en la Agenda 1 del Acta de 1997 de la Protección del funcionamiento del medio ambiente[120]	>90
Fuente modificada	
Cualquier actividad programada que este mencionada en la Agenda 1 del Acta de 1997 de la Protección del funcionamiento del medio ambiente	>35

Fuente: (ENVIRON Australia Pty Ltd, 2011)

[120] El detalle de estas actividades se encuentran en (Protection of the Environment Operations Act, 1997) . Algunas de las actividades mencionadas son: agricultura, acuicultura, producción de químicos y generación de electricidad, entre otros.

Tabla 9-2 Umbrales de emisión de NOx y COV para fuentes estacionarias en zonas saturadas [ton/año]

Tipo de Fuente	Tasa de emisión de NOx/COV [ton/año]
Nueva fuente	
Cualquier actividad programada que este mencionada en la Agenda 1 del Acta de 1997 de la Protección del funcionamiento del medio ambiente localizada en todas las otras zonas[121].	>90
Cualquier actividad programada que este mencionada en la Agenda 1 del Acta de 1997 de la Protección del funcionamiento del medio ambiente localizada en una zona con condición de saturación seria (zona que el promedio de 5 años de las concentraciones máximas de ozono de 1 hora esta entre 0,13 y 0,15 ppm, y/o el promedio de 5 años de las concentraciones máximas de ozono de 4 horas esta entre 0,11 y 0,12 ppm)	>45
Cualquier actividad programada que este mencionada en la Agenda 1 del Acta de 1997 de la Protección del funcionamiento del medio ambiente localizada en una zona con condición de saturación severa (zona que el promedio de 5 años de las concentraciones máximas de ozono de 1 hora esta entre 0,15 y 0,23ppm, y/o el promedio de 5 años de las concentraciones máximas de ozono de 4 horas esta entre 0,12 y 0,19 ppm)	>25
Cualquier actividad programada que este mencionada en la Agenda 1 del Acta de 1997 de la Protección del funcionamiento del medio ambiente localizada en una zona con condición de saturación extrema (zona que el promedio de 5 años de las concentraciones máximas de ozono de 1 hora es mayor a 0,23ppm, y/o el promedio de 5 años de las concentraciones máximas de ozono de 4 horas es mayor a 0,19 ppm)	>10
Fuente modificada	
Cualquier actividad programada que este mencionada en la Agenda 1 del Acta de 1997 de la Protección del funcionamiento del medio ambiente localizada en todas las otras zonas.	>35
Cualquier actividad programada que este mencionada en la Agenda 1 del Acta de 1997 de la Protección del funcionamiento del medio ambiente localizada en una zona con condición de saturación seria.	>25
Cualquier actividad programada que este mencionada en la Agenda 1 del Acta de 1997 de la Protección del funcionamiento del medio ambiente localizada en una zona con condición de saturación extrema.	Cualquier incremento

Fuente: (ENVIRON Australia Pty Ltd, 2011)

[121] Se entiende por "otras zonas" aquellas que no están en las categorías descritas en la tabla (seria, severa o extrema).

9.5 Anexo 5: Cálculo de coeficientes de riesgo unitario de Pope et al. 2020

El cálculo de los coeficientes de riesgo unitario (β) se realizó utilizando la Ecuación 4-1 y los valores de la Tabla 4-7 que corresponden a las estimaciones finales de cociente de riesgo (HR)[122] realizadas por Pope et al. (2020), presentada en la Sección 4.1.2.3.

Tabla 9-3 Estimación de coeficientes de riesgo unitario (β) a partir de un incremento de 10 µg/m³ de MP2,5

Tipos de estudios	Cantidad de estudios	Cociente de riesgo (HR)	(IC 95%)	β estimado
Todos los estudios	75	1,09	(1,07–1,11)	0,00862
Estudios seleccionados	33	1,08	(1,06–1,11)	0,00770
Todos los estudios, Norteamérica	56	1,09	(1,07–1,11)	0,00862
Todos los estudios, Europa	10	1,12	(1,06–1,19)	0,01133
Todos los estudios, Asia	9	1,07	(1,04–1,11)	0,00677
Estudios seleccionados, Norteamérica	16	1,08	(1,05–1,11)	0,00770
Estudios seleccionados, Europa	10	1,12	(1,06–1,19)	0,01133
Estudios seleccionados, Asia	7	1,06	(1,02–1,10)	0,00583
Todos los estudios, con variables individuales del tabaquismo	52	1,07	(1,06–1,09)	0,00677
Estudios seleccionados, con variables individuales del tabaquismo	25	1,08	(1,06–1,10)	0,00770
Todos los estudios, con variables ecológicas/contextuales	45	1,09	(1,07–1,11)	0,00862
Estudios seleccionados, con variables ecológicas/contextuales	19	1,08	(1,05–1,12)	0,00770
Todos los estudios, con variables meteorológicas/climáticas	6	1,14	(1,05–1,24)	0,01310
Estudios seleccionados, con variables meteorológicas/climáticas	3	1,07	(1,07–1,08)	0,00677

Fuente: Elaboración propia a partir de (Pope et al., 2020)

[122] No confundir con el coeficiente de riesgo (beta). Para su comparación ver Sección 4.1.1.3.

9.6 Anexo 6: Análisis de la evaluación ambiental en la región Metropolitana, en los últimos dos años

En el caso de la región Metropolitana, declarada en su totalidad zona saturada por MP_{10}, $MP_{2,5}$, O_3 y CO, se estimó el impacto en las concentraciones para 7 proyectos en total, 4 EIA[123] y 3 DIA. En la Tabla 9-4 se muestran los cambios estimados para los contaminantes saturados en dicha región.

Tabla 9-4 Aporte a las concentraciones de los proyectos aprobados en el SEIA en la región Metropolitana, en 2019-2020 [µg/m³]

Nombre	Tipo	MP_{10}		$MP_{2,5}$		CO	
		Concentración diaria [µg/m³]	Concentración anual [µg/m³]	Concentración diaria [µg/m³]	Concentración anual [µg/m³]	Concentración 1 hora [µg/m³]	Concentración 8 horas [µg/m³]
Recepción, Almacenamiento y Despacho de Cal, Planta Cerro Blanco	DIA	0,0	1,1	0,0	0,1	N/M	N/M
Parque Fotovoltaico El Membrillo	DIA	2,6	0,2	2,2	0,2	N/M	N/M
Cerrillos Data Center	DIA	8,3	2,5	3,3	1,0	0,2	N/M
Desarrollo Inmobiliario Batuco Etapa I	EIA	18,4	7,5	1,7	0,7	N/M	N/M
Optimización Reservas Pozo San Bernardo y Nuevo Plan de Recuperación de Terreno*	EIA	39,8	12,9	11,8	3,5	144,5	47,0
Proyecto ?Etapa 1 Modificación Nudo Quilicura: Túnel Lo Ruiz?*	EIA	57,9	7,9	14,6	2,1	3,4	0,7
Tren Santiago Batuco	EIA	60,3	15,3	3,7	0,9	N/M	N/M

N/M: No modelado.
*: Proyectos que modelaron concentraciones de O_3.

Fuente: Elaboración propia

Comparando con las NPCA respectivas, es posible estimar el aporte porcentual respecto a la norma que estaría aportando cada proyecto, como se muestra en la Tabla 9-5, del mismo modo que se analizó en la Sección 5.3. Se puede observar que, en el caso del MP_{10}, los proyectos aportan hasta un 40% de la NPCA diaria y un 31% anual, encontrándose en el rango de 12% a 40% en el caso de los EIA. En cuanto al $MP_{2,5}$, el aporte es de hasta en 29% de la norma diaria y

[123] Un EIA no estima sus emisiones, el proyecto denominado “Boulevard Cultural Maestranza San Bernardo”.

un 17% de la norma anual. Mientras que, en el caso del CO, los aportes se mantienen en un 0% en los casos en que fueron modelados.

Tabla 9-5 Aporte porcentual de cada proyecto a las concentraciones a las NPCA respectivas [%]

Nombre	Tipo	MP_{10}		$MP_{2,5}$		CO	
		Aporte respecto a NPCA diaria [%]	Aporte respecto a NPCA anual [%]	Aporte respecto a NPCA diaria [%]	Aporte respecto a NPCA anual [%]	Aporte respecto a NPCA 1 hora [%]	Aporte respecto a NPCA 8 horas [%]
Recepción, Almacenamiento y Despacho de Cal, Planta Cerro Blanco	DIA	0%	2%	0%	1%	N/M	N/M
Parque Fotovoltaico El Membrillo	DIA	2%	0%	4%	1%	N/M	N/M
Cerrillos Data Center	DIA	6%	5%	7%	5%	0%	N/M
Desarrollo Inmobiliario Batuco Etapa I	EIA	12%	15%	3%	4%	N/M	N/M
Optimización Reservas Pozo San Bernardo y Nuevo Plan de Recuperación de Terreno*	EIA	27%	26%	24%	17%	0%	0%
Proyecto ?Etapa 1 Modificación Nudo Quilicura: Túnel Lo Ruiz?*	EIA	39%	16%	29%	10%	0%	0%
Tren Santiago Batuco	EIA	40%	31%	7%	5%	N/M	N/M

N/M: No modelado.
*: Proyectos que modelaron concentraciones de O_3.

Fuente: Elaboración propia

9.7 Anexo 7: Detalle de los modelos atmosféricos utilizados por los proyectos para la modelación de la calidad del aire

En la Tabla 9-6 se muestra la información recopilada respecto a los tipos de modelos de calidad del aire utilizados por los proyectos revisados que modelaron la concentración de distintos contaminantes[124]. De estos, hay 34 proyectos que utilizan un modelo refinado tipo "Puff", específicamente Calpuff, complementando con otro modelo meteorológico. Los modelos tipo "Puff" estiman la dispersión de contaminantes provenientes de una emisión instantánea o continua a lo largo de una o varias trayectorias, respectivamente. En particular, el modelo Calpuff es uno de los recomendados por el SEA para la modelación de contaminantes primarios (SEA, 2012b).

Por otro lado, se encontró que 10 proyectos utilizaron un modelo de tipo "Screening" en distintas versiones, los que no son recomendados por el SEA en su guía para la modelación de la calidad del aire primarios (2012b), debido a que su uso es únicamente para determinar la necesidad de utilizar un modelo refinado para estimar los impactos.

También, existe un EIA cuya modelación es realizada mediante AERMod, un modelo gaussiano que es aceptado por el SEA para contaminantes primarios en un dominio menor a cinco kilómetros, ya que en este caso se puede suponer una meteorología homogénea.

Es importante destacar que todos los EIA que realizaron modelación siguieron las recomendaciones del SEA para modelar su impacto en la calidad del aire, en total diez proyectos, de los que nueve utilizaron Calpuff y, como se indicó previamente, uno utilizó AERMod.

Tabla 9-6 Modelos de calidad del aire

Tipo de modelo	Modelo	DIA	EIA	Total proyectos
Puff	Calpuff - Calmet	5		**5**
	Calpuff - WRF	19	9	**28**
	Calpuff - WRF - Calgrid	1		**1**
Screening	AERScreen	5		**5**
	Screen View	1		**1**
	Screen View 3	3		**3**
	Screen View 4	1		**1**
Gaussiano	AERMod		1	**1**
Total proyectos		**35**	**10**	**45**

Fuente: Elaboración propia

[124] Un total de 45 proyectos modelaron el impacto en la calidad del aire de sus emisiones.

9.8 Anexo 8: Reunión de presentación de propuestas preliminares de criterios

Luego del envío del informe en formato de resumen ejecutivo en que se especificaron los criterios escogidos, se realizó una reunión con el equipo técnico del SEA para definir la selección de criterios para su desarrollo en informe final. Esta reunión se realizó el miércoles 18 de enero de 2022, a las 10.00 horas, por medio de la plataforma Microsoft Teams. En la siguiente Tabla 9-7 se presentan los asistentes a la reunión.

Tabla 9-7 Asistentes reunión de presentación de propuestas preliminares de criterios

Nombre	Consultor / Contraparte SEA
Gino Olivares Castro	Contraparte SEA
Damary Fonseca Ayala	Contraparte SEA
Rodrigo Rosales Díaz	Contraparte SEA
Simón Sánchez Caro	Contraparte SEA
Sergio Sanhueza Triviño	Contraparte SEA
Luis Cifuentes	Consultor
Héctor Jorquera	Consultor
Gustavo Lagos	Consultor
Viviana Cerda Gho	Consultor
María Jesús Melej	Consultor
Rocío Herrera	Consultor

Fuente: Elaboración propia

9.9 Anexo 9: Implementación de metodología del cálculo de los SILs en R

La metodología del cálculo de los SILs de la USEPA se implementó en el **software R**. Las principales ventajas de este software son que es de **libre acceso** y, permite un **fácil manejo y análisis** de bases de datos[125]. En particular, se desarrolló un código en este software para generar el *bootstrapping* con el registro de calidad del aire disponible en el Sistema Nacional del Monitoreo de Calidad del Aire (SINCA), calcular los SILs a partir de los resultados del *bootstrapping*, calcular los SILs ponderados para cada Valor de Cumplimiento (VC) y crear los gráficos con los resultados de los SILs para cada VC, periodo y estación de monitoreo.

Para el desarrollo del código se utilizaron **librerías**, que son una ventaja del uso de R y consisten en paquetes con un conjunto de funciones[126] desarrolladas que tienen diferentes objetivos que facilitan la edición, manejo y análisis de los datos. Las librerías que se utilizaron y sus ventajas son:

- **dplyr**[127]: contiene funciones rápidas que permiten una fácil manipulación y operación de bases de datos.
- **ggplot2**[128]**:** permite la creación de gráficos de calidad.
- **openair**[129]**:** permite el análisis, la interpretación y la comprensión de datos de calidad del aire.
- **readr**[130]**:** permite leer de forma rápida y fácil los archivos en formato ".csv".
- **tidyr**[131]**:** permite la limpieza y edición de bases de datos.
- **lubridate**[132]**:** permite trabajar de forma rápida y fácil con datos de tiempo y fecha.

El código para la implementación de la metodología de los SILs de la USEPA se desarrolló en dos archivos **"EMZOSA_Codigo.R"** y "**EMZOSA_funciones.R**" que se encuentra en la **carpeta "EMZOSA-Archivos_R"** adjunta al presente informe en anexos digitales. Adicionalmente, en esta carpeta se encuentra un archivo que corresponde al espacio de trabajo utilizado en el desarrollo de la metodología y otro archivo con un código que es útil para la replicación de esta metodología con registros que no fueron utilizados en este análisis. A continuación, se describe de manera más detallada cada uno de estos archivos:

[125] Se recomienda utilizar el IDE (*Integrated Development Environment*) RStudio o similar para la implementación de la metodología que se explica en el presente Anexo.
[126] Una función es una parte del código de un programa que recibe unos datos de entrada (*input*) y retorna/calcula un *output* de interés a partir del *input*. La utilidad de usar funciones es que facilita y agiliza el cálculo iterativo de variables y el manejo de los datos.
[127] https://www.r-project.org/nosvn/pandoc/dplyr.html
[128] https://cran.r-project.org/web/packages/ggplot2/index.html
[129] https://cran.r-project.org/web/packages/openair/index.html
[130] https://cran.r-project.org/web/packages/readr/index.html
[131] https://cran.r-project.org/web/packages/tidyr/index.html
[132] https://cran.r-project.org/web/packages/lubridate/index.html

- **"EMZOSA_Codigo.R":** es el código utilizado para el cálculo de los SILs con los datos de las estaciones de monitoreo que se observan en la Tabla 6-4. Adicionalmente, se encuentran los cálculos de los SILs ponderados de los distintos VC y los gráficos creados para exponer los resultados. La primera parte del código se encuentra ordenada por **estación de monitoreo** analizada. Para cada estación de monitoreo se cargan primero los datos de calidad del aire a analizar, luego se calculan los VC para cada año y finalmente se obtienen los SILs. En la segunda parte del código se encuentra la **sección de recopilación de los datos**, en la que se compila los SILs de las diferentes estaciones clasificados según contaminante y VC analizado. En la tercera parte están los cálculos de los **SILs ponderados**. Finalmente, se encuentra la **sección de gráficos**, en la cual se diseñaron los gráficos para presentar los resultados.

- **"EMZOSA_funciones.R":** es el código que guarda las funciones creadas para la edición de los datos descargados del SINCA y el cálculo de los SILs. Las funciones creadas y sus descripciones se muestran en la Tabla 9-8.

- **"EMZOSA_Codigo_estándar.R":** es un código elaborado a partir de lo realizado en "EMZOSA_Codigo.R". El objetivo de este código es facilitar la reproducción de la metodología[133] con datos provenientes de estaciones de monitoreo que no fueron consideradas en la presente consultoría. En palabras simples, este código es un *template* con lo necesario para reproducir la metodología realizada para este estudio, desde el código hasta las instrucciones para implementarla.

- **EMZOSA_Espacio_de_trabajo.RDATA:** es un archivo que contiene el "espacio de trabajo" con los objetos y variables que fueron calculados y guardados cuando se obtuvieron los resultados de los SILs. La ventaja de este archivo es poder utilizar directamente los mismos datos cargados y las variables calculadas que se generaron en el cálculo de los SILs expuestos en la presente consultoría, sin tener que cargarlas desde su formato inicial, ya que esto toma tiempo.

Para calcular los SILs es necesario tener el registro temporal de calidad del aire de diferentes estaciones. Por esta razón en el desarrollo de este código se utilizó como *input* la información obtenida del SINCA. Las bases de datos de calidad del aire obtenidas para cada estación se encuentran en la **Carpeta "Registro de Calidad del aire"[134]** en la carpeta **"EMZOSA-Archivos_R".**

El principal *output* del código son los gráficos presentados en la Sección 6.4.2 en formato ".png". La **carpeta "Imágenes"** contiene las imágenes de los gráficos finales con los resultados de los SILs

[133] Metodología para el cálculo de los SILs de la USEPA
[134] En esta carpeta se encuentran diez carpetas con las bases de datos en formato ".csv" de las diez estaciones de monitoreo consideradas para el análisis realizado. El nombre de los documentos ".csv" siguen el siguiente formato: "*Estación de monitoreo_Tipo de registro (horario o diario)_Contaminante*.csv".

obtenidos para los datos de calidad del aire de las estaciones de monitoreo analizadas. Esta carpeta se encuentra en la carpeta "EMZOSA-Archivos_R" del anexo digital.

Tabla 9-8 Descripción de las funciones creadas para el cálculo de SILs en R

Función creada	Descripción
datos_diario (*data, contaminante, outlier, NV*)	Función que edita el formato de datos de registro diario del SINCA. La edición consiste en unificar en una sola variable las columnas de "Registro validado", "Registro preliminar" y "Registro no validado" a través de una selección que prioriza los datos en este mismo orden. Es decir, en primer lugar, se elige el registro validado; si este no existe, se elige el preliminar, y por último el no validado. Adicionalmente, esta función muestra en pantalla *TRUE* (verdadero) si los datos de los trimestres de cada año incluidos en el registro están completos según el criterio de 75% de completitud por trimestre o *FALSE* (falso) en el caso contrario. Por último, la función también elimina los valores incompletos (NA) que se encuentran en el registro de datos. Los argumentos de esta función son: ***data*:** base de datos de calidad del aire del SINCA. ***contaminante*:** código del acrónimo del contaminante al que corresponde la información. Se puede ingresar cualquier nombre referente a un contaminante. Se sugiere "mp10" para MP10 y "mp2,5" para el MP2,5. ***outlier*:** valor por sobre el cual un dato se considera *outlier*[135] y se debe eliminar. Por default este valor es igual a 1.000. ***NV*:** *dummie* que da la opción de no considerar el "Registro no validado". Por default sí se considera este registro ("NV=TRUE"). En caso de no querer considerarlo se de escribir "NV = FALSE".
datos_horarios (*data, contaminante, outlier, NV*)	Función que permite editar el formato de datos de registro horario del SINCA. Realiza el mismo procedimiento y tiene los mismos argumentos que en el caso de la función **datos_diario().**
datos_8HRS (*data, contaminante, outlier, NV*)	Función que permite editar el formato de datos de registro horario del SINCA. Realiza el mismo procedimiento y tiene los mismos argumentos que en el caso de las funciones **datos_diario()** y **datos_horarios()**, pero agrega una columna (c8hr) con el promedio de 8 horas, que se calcula desde la hora del registro hacia delante. También posee los mismos argumentos que la función **datos_horarios().**
boot_mp (*data_mp_24hr, y*)	Función que genera el *bootstrapping* para los datos de un año del registro diario de MP2,5 y MP10. Esta función genera un *output* de cuatro elementos: dos valores de un tercio[136] de VC_o (Valor de Cumplimiento actual), uno del VC de 24 horas y otro del VC anual; y dos vectores de 20.000 valores de un tercio de VC, de 24 horas y anuales, obtenidos del remuestreo. Los argumentos de esta función son: **data_mp_24hr**: base de datos de promedio diario de MP2,5 o MP10. **y**: año al cual se le quiere aplicar el *bootstrapping.*

[135] Un *outlier* es un dato que se considera significativamente diferente/anormal al resto del registro de datos.
[136] Se calcula el valor de un tercio para luego poder obtener el promedio de tres años a partir de la suma de los vectores de tercios de VC de esos años —ya que en computacionalmente realizar una suma es más fácil que un promedio—.

Función creada	Descripción
VC_mp (*data, yinf, ysup*)	Función que aplica la función **boot_mp()** en los años del registro de datos que se quieren incluir en el cálculo de los SILs. Esta función retorna cinco elementos: **1.** Una lista de los tercios de VC_O anual de los diferentes años. **2.** Una lista de los tercios de VC_O de 24 horas de los diferentes años. **3.** Una lista con los vectores de los tercios de VC anual de los diferentes años. **4.** Una lista con los vectores de los tercios de VC de 24 horas de los diferentes años. **5.** Una lista con los años en que se aplicó la función **boot_mp()**. Los argumentos de esta función son: **data**: base de datos de promedio diario de MP2,5 o MP10 de los años que se quieren incluir en el cálculo de los SILs. **yinf**: es el primer año que se desea incluir en el cálculo. **ysup**: es el último año que se desea incluir en el cálculo.
post_mp(*DV, pollutant, yinf, ysup, lugar, yin, norma_anual, norma_diaria*)	Función que retorna como *output* los valores finales de SILs —en porcentaje y en valor absoluto— de los diferentes periodos incluidos en el cálculo. En palabras sencillas, lo que realiza esta función es sumar los VC_o y los vectores de VC de tres años consecutivos, para obtener el valor final de VC_o y el vector final de 20.000 valores de VC. Con estos dos resultados se calcula el valor en porcentaje y en valor absoluto de los SILs según las ecuaciones Ecuación 6-1 y Ecuación 6-2. Los argumentos son: **DV**: una gran lista de cinco elementos. Es el retorno de la función ***VC_mp()***. **pollutant**: contaminante que se desea analizar. **yinf**: es el primer año que está incluido en DV. **ysup**: es el último año que se desea incluir en el cálculo. **lugar**: nombre de la estación de monitoreo. **yin**: es el primer año que se quiere incluir en el cálculo. Por default toma el mismo valor que yinf si no se edita. **norma_anual**: es el valor anual de la normativa de calidad del aire del contaminante para el cálculo del SIL [µg/m^3 o ppb]. Por *default* se utiliza el límite de MP2,5 anual de la normativa chilena de calidad del aire actual, de 20 µg/m^3. **norma_diaria**: es el valor diario de la normativa de calidad del aire del contaminante para el cálculo del SIL [µg/m^3 o ppb]. Por *default* se utiliza el límite de MP2,5 diario de la normativa chilena de calidad del aire, equivalente a 50 µg/m^3.
boot_n8hrs (*data_n_8hr_max, y*)	Función que genera casi el mismo *output* y tiene los mismos argumentos que la función **boot_mp().** La diferencia es que esta función genera el *bootstrapping* para el registro de **Máximo Diario de Ocho Horas (MD8H)**. Se utiliza para los VC de contaminantes O_3 y CO, porque las normativas de estos contaminantes están asociadas a VC de MD8H. Adicionalmente, el output consiste en dos elementos: un tercio de VC_o de MD8H y un vector de 20.000 valores de un tercio de VC de MD8H obtenidos del proceso de *bootstrapping*. El nuevo argumento de esta función es: **data_n_8hr_max**: base de datos de Máximo Diario de Ocho Horas (MD8H).
VC_8hr(*data, yinf, ysup*)	Función similar a **VC_mp()**. La diferencia es que aplica la función **boot_n8hr()** en vez de boot_mp(). Esta función retorna tres elementos: ▪ Una lista de los tercios de VC_O de MD8H de los diferentes años. ▪ Una lista con los vectores de los tercios de VC de MD8H de los diferentes años. ▪ Una lista con los años en que se aplicó la función *boot_n8hr*().

Función creada	Descripción
post_8hrs(*DV, pollutant, yinf, ysup, lugar, norma8hrs , yin*)	Función similar a **post_mp()**. La diferencia es que recibe como *input* el *output* de la función **VC_8hrs()**. Esta función retorna los SILs en porcentaje y absolutos según la normativa de 8 horas. El nuevo argumento es: ▪ **norma8hrs**: es el valor de MD8H de la normativa de calidad del aire del contaminante para el cálculo del SIL [µg/m^3 o ppb]. Por *default* se utiliza el límite de ozono de la normativa chilena de calidad del aire actual, de 120 µg/m^3.
boot_n1hrsv (*data_1hr_max, y, so2*)	Función que genera casi el mismo *output* y tiene casi los mismos argumentos que la función **boot_8hrs().** La diferencia es que genera el *bootstrapping* para el registro del máximo de 1 hora. Se utiliza para los VC de contaminantes NO_2 y CO, porque las normativas de estos contaminantes están asociadas a VC horarios. El output consiste en dos elementos: un tercio de VC_o de máximo 1 hora y un vector de 20.000 valores de un tercio de VC del máximo 1 hora obtenidos del remuestreo. Los nuevos argumentos de esta función son: ▪ **data_1hr_max:** base de datos de registro horario. ▪ **so2:** si el contaminante analizado es el SO_2 entonces se debe introducir en el argumento: "so2=TRUE". Por *default* esta variable es "*FALSE*"
VC_1hr(*data, yinf, ysup, so2*)	Función similar a **VC_8hr().** La diferencia es que aplica la función **boot_n1hrsv()** en vez de boot_ n8hrs ().
post_1hr(*DV, pollutant, yinf, ysup, lugar, yin, norma_horaria*)	Función similar a **post_8hrs()**. La diferencia es que recibe como *input* el *output* de la función VC_1hr(). El nuevo argumento de esta función es: ▪ **norma_horaria**: es el valor horario de la normativa de calidad del aire del contaminante para el cálculo del SIL [µg/m^3 o ppb]. Por *default* se utiliza el límite de NO_2 horario de la normativa chilena de calidad del aire actual, de 400 µg/m^3.
boot_anual (*data,y*)	Función que genera casi el mismo *output* y tiene casi los mismos argumentos que la función **boot_8hrs()**. La diferencia es que genera el *bootstrapping* para el registro anual. Se utiliza para los VC de contaminantes NO_2 y SO_2, porque las normativas de estos contaminantes están asociadas a VC anuales. Adicionalmente, el output consiste en dos elementos: un tercio de VC_o anual y un vector de 20.000 valores de un tercio de VC anual obtenidos del remuestreo.
VC_anual(*data,yinf, ysup*)	Función similar a **VC_8hr()**. La diferencia es que aplica la función **boot_anual()** en vez de boot_ n8hrs ().
post_anual(*DV, pollutant, yinf, ysup, lugar, yin, norma_anual*)	Función similar a **post_8hrs()**. La diferencia es que recibe como *input* el *output* de la función VC_anual(). El argumento distinto a post_8hrs() es: ▪ **norma_anual**: es el valor horario de la normativa de calidad del aire del contaminante para el cálculo del SIL [µg/m^3 o ppb]. Por *default* se utiliza el límite de NO_2 anual de la normativa chilena de calidad del aire actual, de 100 µg/m^3.
boot_diario (*data, y*)	Función que genera casi el mismo *output* y tiene casi los mismos argumentos que la función boot_8hrs(). La diferencia es que genera el *bootstrapping* para el registro diario. Se utiliza para los VC de contaminantes SO_2, porque la normativa de estos contaminantes está asociada a VC diario. El output consiste en dos elementos: un tercio de VC_o diario y un vector de 20.000 valores de un tercio de VC diario obtenidos del remuestreo.
VC_diario(*data, yinf, ysup*)	Función similar a **VC_8hr()**. La diferencia es que aplica la función **boot_diario()** en vez de boot_ n8hrs ().

Función creada	Descripción
post_diario(*DV, pollutant, yinf, ysup, lugar, yin, norma_diaria*)	Función similar a **post_8hrs()**. La diferencia es que recibe como *input* el *output* de la función **VC_diario()**. El argumento distinto a post_8hrs() es: ▪ **norma_diaria**: es el valor horario de la normativa de calidad del aire del contaminante para el cálculo del SIL [µg/m^3 o ppb]. Por *default* se utiliza el límite de SO_2 diario de la normativa chilena de calidad del aire actual, de 150 µg/m^3.
region(*monitor*)	Función que retorna la zona (Norte, Centro, Sur, Costa) a la que pertenece una estación de monitoreo. En el caso de agregar más estaciones, esta función debe ser modificada y agregar el nombre de las estaciones al vector de la zona a la que pertenecen.

Fuente: Elaboración propia

9.9.1 Manuales para utilizar los archivos enviados

A continuación, se presentan dos manuales con las instrucciones para ejecutar los archivos con los códigos adjuntos al informe. El primer manual corresponde a las instrucciones para observar y reproducir los resultados presentados en esta consultoría y el segundo manual tiene las indicaciones para reproducir la metodología y utilizar el código desarrollado en R con registros de otras estaciones de monitoreo que no fueron consideradas en este estudio.

9.9.2 Manual para la reproducción de resultados de los SILs presentados en la consultoría

En esta sección se describen las instrucciones para la reproducción de los resultados de los SILs obtenidos en R a partir del registro de calidad del aire de diez estaciones de monitoreo de la red SINCA, presentados en la Sección 6.4. La descripción de los archivos descritos se presenta al inicio de esta sección (ver inicio Sección 0).

1. Abrir y cargar los archivos: **"EMZOSA_funciones.R", "EMZOSA_Espacio_de_trabajo.RDATA"** y **"Codigo_emzosa_4.R"**[137].
2. Cargar la sección **"Recopilación de datos de los monitores**" para tener acceso a los resultados de los SILs recopilados por VC de cada contaminante, estación y periodo. Estos resultados corresponden a los graficados en la Sección 6.4.2. Adicionalmente, si se carga la sección **"Cálculo de mediana de SILs (SIL ponderado) por contaminante y VC"** se obtienen los SILs ponderados expuestos en la Tabla 6-5.
3. Cargar la sección **"Gráficos"** para reproducir los gráficos presentados en la Sección 6.4.2 en el presente informe.

[137] No es necesario correr este código completo, sólo las secciones "Recopilación de datos", "Cálculo de mediana de SILs (SIL ponderado) por contaminante y VC" y "Gráficos", debido a que al cargar el archivo "**EMZOSA_Espacio_de_trabajo.RDATA**" se recopila el "espacio de trabajo" con los objetos y variables que ya fueron calculadas previamente en el desarrollo del cálculo de los SILs.

9.9.3 Manual para homologar el cálculo de los SILs con otros registros de datos del SINCA

Las siguientes instrucciones corresponden a los pasos que se deben seguir para calcular nuevos SILs a partir de bases de datos de calidad del aire de estaciones de monitoreo que no fueron incluidos en el análisis de esta consultoría.

1. Abrir y cargar el archivo **"EMZOSA_funciones.R".** Se debe cargar este código para tener disponibles las funciones que se utilizan en el archivo "**EMZOSA_Codigo_estándar.R".**
2. Abrir el archivo "**EMZOSA_Codigo_estándar.R".**
3. Crear un nuevo archivo ".R" (*script*). Luego, copiar y seguir las instrucciones de la sección **"CÁLCULO DE SILS PARA UNA ESTACIÓN**" del código **"EMZOSA_Código_estándar.R"** para cada estación y contaminante para el que se desea calcular los SILs. En este código están las instrucciones a seguir para calcular los SILs para registro de un contaminante para una estación de monitoreo y a partir del registro de datos obtenidos del SINCA.
4. Por último, se debe copiar y seguir las instrucciones del código de la sección de **"Recopilación de datos**" del código **"EMZOSA_Código_estándar.R"** para recopilar los SILs relacionados a un VC de un contaminante y obtenidos de las diferentes estaciones en una tabla y poder calcular los SILs ponderados para cada contaminante.