

BANCO DE ALTERNATIVAS DE COMPENSACIÓN DE EMISIONES PARA LA CIUDAD DE CALAMA Y SU ÁREA CIRCUNDANTE

Informe Final Parte 2
Preparado para:



Ministerio del
Medio
Ambiente

In-Data SpA	AUTOR: Alejandro Cofré	VERSIÓN: 2
	FECHA DE CREACIÓN: 08 de noviembre de 2022 FECHA DE ENTREGA: 9 de diciembre de 2022	
	<p>ESTADO</p> <p><input type="checkbox"/> Borrador <input type="checkbox"/> Preliminar <input checked="" type="checkbox"/> Definitivo</p>	<p>DESTINATARIO</p> <p>SEREMI del Medio Ambiente de la región de Antofagasta.</p>

Contacto

Cristian Yáñez Otárola

In-Data

Representante Legal

Diagonal Oriente 1630, Oficina 201, Providencia

Correo: cyanez@in-data.cl

Teléfono: +56 9 9730 8186

www.in-data.cl

Alejandro Cofre

INGEA

Representante Legal

San Pio X 2390 Oficina 506, Providencia

Correo: acofre@ingea.cl

Teléfono: +56 9 9883 4300

www.ingeachile.cl/

Contenido

Contenido.....	3
Índice de tablas	4
Índice de Figuras.....	5
1. Introducción	6
2. Objetivos	7
2.1. Objetivo general.....	7
2.2. Objetivos específicos	7
3. Antecedentes Sobre Compensación de Emisiones Según DS N° 5/2021	8
4. Selección de proyectos factibles de aplicar en la ciudad de Calama para compensar emisiones.....	11
5. Mecanismo de Compensación.....	13
5.1. Recambio de Calefactores.....	14
5.2. Chatarrización de Motores	21
5.3. Reducción de Emisiones en Calderas, Fuentes Fijas Industriales y/o Comerciales	29
5.4. Filtros DPF Para Fuentes Móviles	34
5.5. Techos y/o Muros Verdes	40
5.6. Pavimentación de Calles	48
5.7. Lavado y aspirado de Calles	55
5.8. Plantación y/o Mantenimiento de Áreas Verdes	62
5.9. Estabilización de veredas, bermas y bandejes.....	66
6. Formato de Ingreso de Nuevos Mecanismos de Compensación	70
7. Estructura de Informe de Programa de Compensación de Emisiones (PCE).....	72
8. Resumen de valores por defecto para este banco de proyectos de alternativas de compensación de emisiones	80
9. Bibliografía	85

Índice de tablas

Tabla 3-1. Valores que determinan la obligación de compensar dentro de la ciudad de Calama y su área circundante	10
Tabla 5.1-1. Resumen cumplimiento de criterios mecanismo de compensación: recambio de calefactores	16
Tabla 5.1-2. Ventajas y desventajas mecanismo de compensación: recambio de calefactores	17
Tabla 5.1-3. Valor por defecto factor de emisión calefactor a leña.....	18
Tabla 5.1-4. Valor por defecto niveles de actividad calefactores a leña	18
Tabla 5.1-5. Acreditación plan de seguimiento: recambio de calefactores	19
Tabla 5.2-1. Resumen cumplimiento de criterios mecanismo de compensación: chatarrización de motores	22
Tabla 5.2-2. Ventajas y desventajas mecanismo de compensación: chatarrización de motores	22
Tabla 5.2-3. Resumen factores de emisión por defecto para vehículos pesados.	23
Tabla 5.2-4. Resumen factores de emisión por defecto para buses.....	24
Tabla 5.2-5. Resumen niveles de actividad por defecto para fuentes móviles....	25
Tabla 5.2-6. Acreditación plan de seguimiento: Chatarrización de motores.....	26
Tabla 5.3-1. Resumen cumplimiento de criterios mecanismo de compensación: filtros para fuentes fijas industriales y/o comerciales.....	29
Tabla 5.3-2. Ventajas y desventajas mecanismo de compensación: filtros para fuentes fijas industriales y/o comerciales	30
Tabla 5.3-3. Acreditación plan de seguimiento: Filtros para fuentes fijas industriales y/o comerciales o cambio a combustible limpio.....	31
Tabla 5.4-1. Resumen cumplimiento de criterios mecanismo de compensación: filtros DPF para fuentes móviles	35
Tabla 5.4-2. Ventajas y desventajas mecanismo de compensación: filtros DPF para fuentes móviles	36
Tabla 5.4-3. Acreditación Nivel de eficiencia lograda para sistemas de Post Tratamiento de Emisiones, certificados.....	37
Tabla 5.4-4. Acreditación plan de seguimiento: Filtros DPF para fuentes móviles	38
Tabla 5.5-1. Resumen cumplimiento de criterios mecanismo de compensación: techos y/o muros verdes	42
Tabla 5.5-2. Ventajas y desventajas mecanismo de compensación: techos y muros verdes.....	43
Tabla 5.5-3. Comparación por especies: Mono especie y Mix en techos y muros	45
Tabla 5.5-4. Captura MP10 y MP2,5 por Mono especie	45
Tabla 5.5-5. Acreditación plan de seguimiento: techos verdes	46
Tabla 5.6-1. Resumen cumplimiento de criterios mecanismo de compensación: pavimentación de calles.....	48
Tabla 5.6-2. Ventajas y desventajas mecanismo de compensación: pavimentación de calles	49
Tabla 5.6-3. Parámetros por defecto factores de emisión para resuspensión de MP10 por tránsito de vehículos en caminos no pavimentados.....	49
Tabla 5.6-4. Fórmula para determinar el factor de emisión en calle pavimentada	50
Tabla 5.6-5. Acreditación plan de seguimiento: pavimentación de calles	53

Tabla 5.6-6. Resumen medición de flujo ejemplo aplicado	54
Tabla 5.7-1. Resumen cumplimiento de criterios mecanismo de compensación: pavimentación de calles.....	56
Tabla 5.7-2. Ventajas y desventajas mecanismo de compensación: pavimentación de calles	56
Tabla 5.7-3. Fórmula para determinar el factor de emisión en calle pavimentada	57
Tabla 5.7-4. Acreditación plan de seguimiento: aspirado y lavado de calles.....	60
Tabla 5.7-5. Resumen medición de flujo ejemplo aplicado	60
Tabla 5.8-1. Resumen cumplimiento de criterios mecanismo de compensación: construcción y/o mantención de áreas verdes.....	63
Tabla 5.8-2. Ventajas y desventajas mecanismo de compensación: construcción y/o mantención de áreas verdes	64
Tabla 5.8-3. Acreditación plan de seguimiento: construcción y/o mantención de áreas verdes.....	65
Tabla 5.9-1. Resumen cumplimiento de criterios mecanismo de compensación: Estabilización de veredas, bermas y bandejones	67
Tabla 5.9-2. Ventajas y desventajas mecanismo de compensación: Estabilización de veredas, bermas y bandejones.....	67
Tabla 5.9-3. Parámetros de emisiones en bandejones y veredas	68
Tabla 5.9-4. Acreditación plan de seguimiento: estabilización de veredas, bermas y bandejones	69
Tabla 6-1. Resumen cumplimiento de criterios mecanismo de compensación...	71
Tabla 6-2. Acreditación plan de seguimiento	71
Tabla 8-1. Equivalencia MP10/MP2,5 Combustión versus MP10 resuspensión y SO2.....	80
Tabla 8-2. Valor por defecto factor de emisión calefactor a leña.....	80
Tabla 8-3. Resumen factores de emisión por defecto para vehículos pesados....	80
Tabla 8-4. Resumen factores de emisión por defecto para buses	81
Tabla 8-5. Resumen niveles de actividad por defecto para fuentes móviles.....	81
Tabla 8-6. Acreditación Nivel de eficiencia lograda para sistemas de Post Tratamiento de Emisiones, certificados.....	82
Tabla 8-7. Comparación por especies: Mono especie y Mix en techos y muros	82
Tabla 8-8. Parámetros por defecto factores de emisión para resuspensión de MP10 por tránsito de vehículos en caminos no pavimentados	83
Tabla 8-9. Fórmula para determinar el factor de emisión en calle pavimentada.	84
Tabla 8-10. Parámetros de emisiones en bandejones y veredas	84

Índice de Figuras

Figura 5.5-1. Comparación de captura de MP2,5 en mono especie y mix para techos verdes.....	44
Figura 5.5-2 Comparación de captura de MP2,5 en mono especie y mix para muros verdes.....	44
Figura 7-1. Contenidos Programa de Compensación de Emisiones.....	73

1. Introducción

El D.S. N°57, publicado el 30 de mayo de 2009, declara zona saturada por material respirable MP10, a la ciudad de Calama y su área circundante de Calama. 13 años después, el 12 de mayo de 2022, se promulga el D.S. N°5 que “Establece el Plan de Descontaminación Atmosférico para la ciudad de Calama y su área circundante” o “PDA de Calama”.

El objetivo del PDA de Calama es dar cumplimiento a la norma primaria vigente de calidad ambiental de aire de Material Particulado Respirable (MP10), en un plazo de cinco años.

Todo proyecto nuevo, modificación y/o ampliación de proyecto existente a ejecutarse en la ciudad de Calama y su área circundante, y que se someta o deba someterse al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental, deberá compensar sus emisiones totales anuales, directas o indirectas, que impliquen un aumento sobre la situación base, en valores iguales o superiores a los que se presentan en el Artículo 57 del PDA de Calama.

De acuerdo al artículo 58 del capítulo VIII del DS N°5/2021, la compensación de emisiones se hará por medio de programas de compensación de emisiones, aprobados por la Seremi del Medio Ambiente.

En este documento, se conforma un banco de alternativas, con siete mecanismos de compensación de emisiones, con el fin de que los titulares de los proyectos cuenten con alternativas para implementar sus programas de compensación de emisiones, en el caso que deban compensar emisiones de acuerdo a lo que establezca la Resolución de Calificación Ambiental (RCA) del proyecto.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

El objetivo general de este documento es la presentación de un banco de alternativas con mecanismos de compensación de emisiones, para recomendar a los titulares de proyectos que hayan ingresado al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) y que deban compensar sus emisiones, de acuerdo con lo establecido en su Resolución de Calificación Ambiental (RCA).

2.2. Objetivos específicos

- a) Definir la metodología de cálculo de emisiones para cada mecanismo, considerando factores de emisión y niveles de actividad adecuados, acompañado de ejemplos prácticos.
- b) Establecer planes de seguimiento generales y específicos para cada mecanismo, para verificar la adecuada implementación del programa de compensación de emisiones y su correcta ejecución en el tiempo.
- c) En el caso de la determinación de la reducción por pavimentación de calles, considerar parámetros aplicables a Calama de acuerdo a estudio realizado.

3. Antecedentes Sobre Compensación de Emisiones Según DS N° 5/2021

Un Programa de Compensación de Emisiones (PCE) corresponde a un instrumento de gestión ambiental que permite a un titular de un proyecto nuevo, modificación y/o ampliación de proyecto existente, a ejecutarse dentro de la ciudad de Calama y su área circundante, evaluado en el marco del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), compensar sus emisiones declaradas siempre que estas superen los límites establecidos en el artículo 58 del PDA de Calama, dando cumplimiento de este modo al DS 5/2021 que establece el Plan de Descontaminación Atmosférica para la ciudad de Calama y su área circundante (MMA, 2021).

El espíritu de este banco de proyectos de alternativas de compensación de emisiones es ser una herramienta de apoyo para los titulares que deban compensar sus emisiones.

Tomando en cuenta lo anterior, es necesario que los titulares consideren en la génesis del diseño del proyecto, minimizar sus emisiones de contaminantes atmosféricos que a consecuencia de este se van a generar, e incorporar en sus costos y su cronograma la compensación de las emisiones por sobre los límites establecidos en el artículo 58 del DS N°5/2021 (MMA, 2021).

Así, a modo de ejemplo, los titulares deberán contemplar la implementación, entre otras, de algunas de las siguientes medidas, que van a contribuir a disminuir las emisiones de contaminantes atmosféricos:

- Uso de maquinaria con estándar de emisión moderno para las actividades del proyecto (TIER IV o superior).
- Uso de flota vehicular para el transporte asociado al proyecto que cumplan estándares de emisión modernos (EURO V, EURO VI o eléctrico).
- Realizar humectación o aplicar supresores de polvo para caminos no pavimentados.
- Utilización de filtros o sistemas de abatimiento de emisiones para fuentes fijas y para maquinaria fuera de ruta.
- Instalación de techos y/o muros verdes en las superficies de las infraestructuras asociadas al proyecto.

El conjunto de las medidas anteriores hará que el proyecto idealmente no deba compensar sus emisiones y que, si debe compensar, lo deba hacer por un monto equivalente a las emisiones que efectivamente el proyecto no pueda reducir considerando medidas.

Muchas veces resulta más económico considerar medidas de control, mitigación o abatimiento de emisiones en el diseño del proyecto que realizar un PCE de emisiones por sobrestimar las emisiones atmosféricas.

De acuerdo al artículo 58 del capítulo VIII del DS N°5/2021, la compensación de emisiones se hará por medio de programas de compensación de emisiones aprobados por la Seremi del Medio Ambiente.

En el mismo artículo, se establece que los contenidos mínimos de un PCE deben ser los siguientes:

1. Estimación anual de las emisiones del proyecto, distinguidas para las fases de construcción, operación y cierre, indicando el año y fase a compensar en la que se prevé que se superará el umbral indicado en la tabla 17 para los contaminantes que corresponda.
2. La/s medida/s de compensación deben cumplir con los siguientes criterios:
 - i. Cuantificables, esto es, que permitan cuantificar la reducción de las emisiones que se produzca a consecuencia de ellas.
 - ii. Verificables, esto es, que generen una reducción de emisiones que se pueda cuantificar con posterioridad a su implementación.
 - iii. Adicionales, entendiendo por tal que las medidas propuestas no respondan a otras obligaciones a que esté sujeto el titular, o bien, que no correspondan a una acción que conocidamente será llevada a efecto por la autoridad pública o particulares.
 - iv. Permanentes, entendiendo por tal que la rebaja permanezca por el período en que el proyecto está obligado a reducir emisiones.
3. Forma, oportunidad y ubicación en coordenadas WGS84, de su implementación, con un indicador de cumplimiento del PCE.
4. Carta Gantt que considere todas las etapas de implementación de la compensación de emisiones y la periodicidad en que se va a informar a la Superintendencia del Medio Ambiente sobre el estado de avance de las actividades comprometidas.

En términos generales, para los programas de compensación de emisiones se debe considerar lo siguiente:

- a. Sólo se podrán compensar o ceder emisiones entre aquellas fuentes que demuestren cumplir con uno de los siguientes requisitos:
 - i. Realizar la compensación entre fuentes o actividades con combustión; o,
 - ii. Realizar la compensación entre una fuente con combustión, que cede emisiones a una fuente o actividad sin combustión, pero no viceversa; o,
 - iii. Realizar la compensación entre fuentes o actividades sin combustión.
- b. En ningún caso podrá hacer valer emisiones cedidas por actividades o establecimientos que cierren o deban cerrar por incumplimiento de normativa ambiental, o por término de vida útil. En el caso de proyectos mineros, la vida útil se entenderá contemplando las extensiones que sean aprobadas en el marco del SEIA.
- c. Las actividades emisoras que reduzcan emisiones para cumplir con las medidas exigidas en el presente Plan, sólo podrán compensar o ceder emisiones por reducciones adicionales a la exigencia legal o reglamentaria, y siempre y cuando sea acreditable su implementación de manera permanente.
- d. Las compensaciones podrán realizarse entre diversos tipos de fuentes, actividades y

sectores económicos, siempre y cuando cumplan con los criterios anteriores.

Las condiciones mencionadas en relación con la compensación de emisiones no sustituirán las exigencias impuestas en otras normativas vigentes en la zona sujeta al plan.

Por otro lado, a efectos de la compensación de emisiones, aquellos proyectos existentes que con posterioridad a la entrada en vigencia del DS N°5/2021 presenten alguna/s modificación/es y/o ampliación/es y que tengan que ingresar al SEIA, deberán sumar estas emisiones a las anteriores que forman parte del proyecto, exceptuando aquellas que hayan sido compensadas previamente.

La compensación de emisiones se formalizará mediante un registro administrado por la Seremi del Medio Ambiente.

De acuerdo al artículo 57 del capítulo VIII del DS N°5/2021, todos aquellos proyectos y actividades que ingresen al SEIA deberán cumplir con las siguientes condiciones:

- i. Deberán compensar sus emisiones totales anuales, directas e indirectas, aquellos proyectos o actividades nuevas y las modificaciones de los proyectos existentes que en cualquiera de sus etapas generen un aumento sobre la situación base, en valores iguales o superiores a los que se presentan en la Tabla 3-1

Tabla 3-1. Valores que determinan la obligación de compensar dentro de la ciudad de Calama y su área circundante

Contaminante	Emisión máxima (t/año)
Material particulado respirable (MP ₁₀)	10
Material particulado fino (MP _{2,5})	5
Dióxido de azufre (SO ₂)	50

Fuente: Tabla 17 artículo 57 D.S. N°5/2021, Plan de Descontaminación Atmosférica para la ciudad de Calama y su área circundante

- ii. La situación base corresponde a todas aquellas emisiones atmosféricas existentes dentro de la ciudad de Calama y su área circundante, previo al ingreso del proyecto o actividad en cuestión al SEIA. No se pueden imputar a dicha situación base las emisiones generadas con infracción al DS N°5/2021 o a la normativa ambiental vigente.
- iii. Se considerarán como emisiones directas las que se emitirán dentro del predio o terreno donde se desarrolle la actividad, asociadas a la fase de construcción, operación o cierre.
- iv. Se entenderá por emisiones indirectas las que se generan exclusivamente para el desarrollo de la actividad, pero fuera del predio, como por ejemplo las emisiones generadas por la circulación de vehículos tanto livianos como pesados que ingresan insumos, o retiran residuos del predio, entre otros.
- v. Los proyectos evaluados que sean aprobados con exigencias de compensación de emisiones, solo podrán dar inicio a la ejecución del proyecto o actividad al contar con la aprobación del respectivo PCE.

- vi. Los proyectos o actividades que ingresen al SEIA compensarán sus emisiones en un 120%. Los excedentes de emisión generados por sobre estas compensaciones podrán ser utilizados para otras compensaciones de emisiones.

4. Selección de proyectos factibles de aplicar en la ciudad de Calama para compensar emisiones

A partir de la experiencia a nivel nacional en programas de compensación de emisiones, se puede destacar la primera guía desarrollada, que corresponde al año 2005 Plan Verde de CONAMA RM, que desarrolla metodología de compensación con la creación y mantención de áreas verdes, en el año 2016, se desarrolla una guía de compensación para la ciudad de Andacollo, en el año 2019 una Guía de compensación para la zona de Concón, Quintero y Puchuncaví, y finalmente, en el año 2019, se desarrolla la Guía de alternativas de compensación de emisiones para la Región Metropolitana.

La guía 2016 de banco alternativas de compensación de emisiones en Andacollo, en adelante Guía Compensación 2016 Andacollo, desarrolla las siguientes alternativas de compensación:

- a) Compensación de Emisiones con Pavimentación
- b) Compensación de Emisiones con Forestación
- c) Compensación de Emisiones con Eco Envoltentes Vegetales
- d) Compensación de Emisiones con estabilización de caminos no pavimentados
- e) Compensación de Emisiones con aspirado de calle
- f) Compensación de Emisiones mediante el retiro de relaves
- g) Compensación de Emisiones mediante la fito estabilización de relaves

La guía 2019 para la compensación de emisiones para las comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví, en adelante Guía Compensación 2019 Concón, Quintero y Puchuncaví, desarrolla las siguientes alternativas de compensación:

- a) Recambio de calefactores a leña por calefactores a leña nuevo de mejor eficiencia.

Finalmente, la guía 2019 de alternativas de compensación de emisiones para la Región Metropolitana, en adelante Guía Compensación 2019 RM, desarrolla las siguientes alternativas:

- a) Recambio de calefactores a leña por a pellet o eléctricos
- b) Chatarrización de motores.
- c) Filtros para fuentes fijas industriales o comerciales
- d) Filtros DPF para fuentes móviles.
- e) Recambio o mejoras tecnológicas para calderas
- f) Techos y/o muros verdes.
- g) Pavimentación de calles.

Los proyectos considerados para este banco de proyectos, son los siguientes:

- a) Recambio de calefactores.
- b) Chatarrización de motores.

- c) Reducción de emisiones en calderas y fuentes fijas industriales y/o comerciales.
- d) Filtros DPF para fuentes móviles.
- e) Techos y/o muros verdes.
- f) Pavimentación de calles.
- g) Lavado de calles
- h) Estabilización de veredas, bermas y bandejones
- i) Plantación y mantención de áreas verdes

5. Mecanismo de Compensación

En este capítulo, se presentan 9 opciones de compensación de emisiones, las que corresponden a:

- ✓ Recambio de calefactores.
- ✓ Chatarrización de motores.
- ✓ Reducción de emisiones en calderas y fuentes fijas industriales y/o comerciales.
- ✓ Filtros DPF para fuentes móviles.
- ✓ Techos y/o muros verdes.
- ✓ Pavimentación de calles.
- ✓ Aspirado/lavado de calles
- ✓ Plantación y mantención de áreas verdes
- ✓ Estabilización de veredas, bermas y bandejones

La justificación de la pertinencia de aplicar cada uno de ellos para la ciudad de Calama, se presenta en el análisis y desarrollo de cada uno de ellos. No se contempló una metodología para estabilización de relaves, como existe en la Guía de Andacollo, debido a que se considera que las medidas de mitigación están incluidas en los respectivos proyectos y sus RCA.

El titular puede considerar otras alternativas también.

Tal como se presentó en tabla 3-1 de este informe, los valores que determinan la obligación de compensar emisiones serían de 10 t/año en MP10, 5 t/año en MP2,5 y 50 t/año en SO2. Al respecto, es posible aplicar equivalencias entre contaminantes, para lo cual, se pueden considerar las siguientes.

i) Relación MP10 Combustión versus MP10 Resuspensión.

La siguiente tabla, presenta la equivalencia MP10 Combustión versus MP10 Resuspensión, aplicada en otras regiones de Chile e indica el valor propuesto para Calama.

Contaminante	Emisión equivalente MP10 Combustión (t/año)	Referencia
1 t/año MP10 Resuspensión	4	PPDA Región Metropolitana, DS 31/2017. No se indica, pero se ha aceptado en varios PCE.
1 t/año MP10 Resuspensión	4	Artículo 54 PDA comunas Concepción Metropolitano, DS 6/2019
1 t/año MP10 Resuspensión	3	Artículo 45 PDA valle Central O'Higgins, en trámite
1 t/año MP10 Resuspensión	3	Valor propuesto a aplicar en PDA Calama

El artículo 54 del PDA comunas Concepción Metropolitano, similar al artículo 45 del PDA Valle Central O'Higgins indica en su puntoiv: *Cuando se trate de la compensación de una emisión compuesta predominantemente de material particulado grueso (fracción*

de tamaños superiores a 2,5 micrómetros), se podrán realizar compensaciones que impliquen el retiro o rebaja de emisiones provenientes de procesos de combustión en razón de una unidad másica de material particulado de combustión retirado, por cada cuatro unidades de material particulado grueso emitido.

En la práctica, lo anterior aplica al MP10 de polvo resuspendido, que en su mayoría corresponde a MP10 grueso. Por otra parte, el MP10 de combustión tal como el proveniente de la combustión de calefactores a leña o de motores diésel de buses o camiones corresponden a MP2,5. El factor 4 aplicado, es positivo desde el punto de vista ambiental, debido a que el MP2,5 permanece en el aire por varios días en cambio el PM10 por solo horas, por lo tanto, la equivalencia puede ser aún mayor.

Dado que el factor en Calama no está establecido en el respectivo Decreto, y considerando una situación conservadora, se propone aplicar un factor 3 al igual que el que se aplica en el PDA de la Región de O'Higgins, más conservador que el factor 4 que se aplica en Concepción y la Región Metropolitana.

ii) Relación MP10 Combustión versus SO₂.

La siguiente tabla, presenta la equivalencia MP10 Combustión versus SO₂, aplicada en otras regiones de Chile e indica el valor propuesto para Calama.

Contaminante	Emisión equivalente MP10 Combustión (t/año)	Referencia
1 t/año SO ₂	0,34089	Artículo 61. PPDA Región Metropolitana, DS 31/2017.
1 t/año SO ₂	0,297	Artículo 54 PDA comunas Concepción Metropolitano, DS N°6/2019
1 t/año SO ₂	0,029	Artículo 42 PPDA comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví.
1 t/año SO ₂	0,2	Valor propuesto a aplicar en PDA Calama

Dado que el factor en Calama no está establecido en el respectivo Decreto, y considerando una situación conservadora, se propone aplicar un factor 0,2 más conservador que el aplicado en el PPDA de la Región de Metropolitana y del aplicado en el PDA de Concepción. No así, respecto del aplicado en Concón, Quintero y Puchuncaví, que es un valor del orden de 10 veces más bajo a las otras regiones.

5.1. Recambio de Calefactores

Antecedentes, referencias y justificación para su aplicación en Calama.

Esta medida de compensación de emisiones, se aplica en general desde la Región Metropolitana hacia el sur donde existe la exigencia de planes de descontaminación.

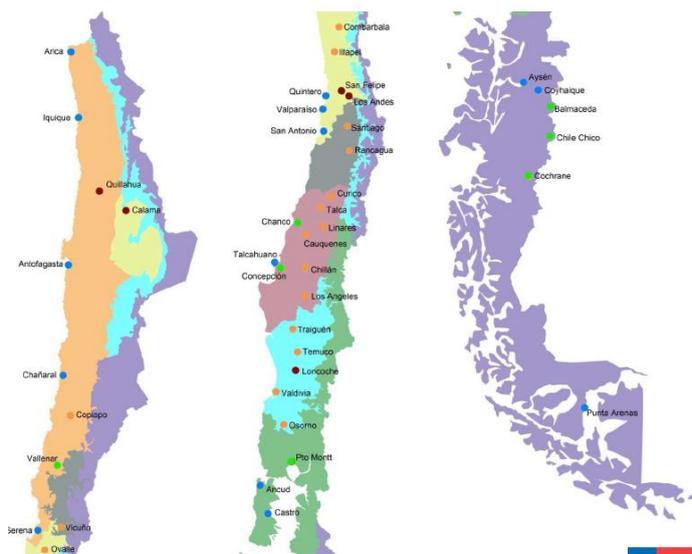
Como guía de compensación de emisiones, se cuenta con la Guía Compensación 2019 Concón, Quintero y Puchuncaví y la Guía Compensación 2019 RM. En ciudades del Sur de Chile el uso de la leña como calefacción es mayor que en la zona centro y norte, debido

a que el número de días fríos es mayor. En general, para calcular la reducción unitaria por retiro de un calefactor a leña, se utiliza el mismo factor de emisión unitario de 11,2 g/h de MP10/MP2,5, según estudio de propuesta de medidas para el uso eficiente de la leña en la Región Metropolitana (CDT, 2012), pero el nivel de actividad varía según la ciudad, respecto a utilizar un valor promedio de horas anuales de uso del calefactor. Cabe señalar que el factor de emisión de 11,2 g/h, es el mismo para MP10 y para MP2,5, ya que, de acuerdo al estudio ya señalado, toda la emisión por combustión de la leña es MP2,5 y por lo tanto el factor de MP10 es el mismo.

Para determinar el nivel de actividad se aplican las siguientes fuentes:

- Usos finales de la Energía 2018 (Minenergía , 2018)
- Encuesta Casen 2017

Para efectos de caracterizar el uso de leña en Calama, y dado que no se han realizado encuestas que caractericen su uso, se procede a utilizar comunas que posean la misma zona térmica (zona térmica 2), y que sean mediterráneas, ya que en general poseen el mismo comportamiento de uso de calefacción. En base a esto, se levanta la caracterización de uso de leña del estudio Usos finales de la Energía 2018, que posee caracterización de las comunas de Calera, Villa Alemana, Limache, Olmué, San Felipe y Quillota, que corresponden a la misma zona térmica que Calama, y poseen oscilaciones térmicas similares.



En este contexto, el promedio de uso de calefacción de leña se estima en 713 h/año, versus en la Región Metropolitana que se utiliza un valor de 2.008 h/año.

De acuerdo a estos valores la emisión que se logra al retirar 1 calefactor a leña sería 3 veces menos que la lograda en la Región Metropolitana, y por lo tanto, su costo relativo sería 3 veces mayor. Aún así, se considera pertinente desarrollar esta metodología para que el titular pueda evaluar esta opción. Según casen 2017, el uso de calefacción en Calama es de 1,2%, por lo tanto, se estima del orden de 672 viviendas que utiliza leña como calefacción en esta ciudad. Una experiencia internacional se puede encontrar en Environment Protection Authority de Australia (EPA, 2002).

Descripción del mecanismo

Este mecanismo de compensación consiste en realizar el recambio de calefactores a leña antiguos actualmente existentes dentro de la ciudad de Calama y su área circundante, por calefactores modernos que generen menos emisiones de contaminantes atmosféricos o que no las generen. El uso de calefactores a leña en la ciudad de Calama y su área circundante no está prohibido.

La compensación de emisiones se realiza por medio del retiro, recambio y chatarrización de calefactores y cocinas que utilicen o puedan utilizar leña, carbón vegetal y otros derivados de la madera.

En la Tabla 5.1-1 se presenta el resumen de cumplimiento de criterios para este mecanismo de compensación, el cual se puede utilizar como referencia para la elaboración del informe del PCE si se selecciona este mecanismo para compensar emisiones.

Tabla 5.1-1. Resumen cumplimiento de criterios mecanismo de compensación: recambio de calefactores

Criterio	Detalle
Medible	Se han realizado mediciones a calefactores a leña, y los valores a utilizar provienen de estudios validados y aceptados.
Verificable	El uso del calefactor a leña es verificable en base a la evidencia a presentar por el proponente tal como fotografías y acuerdo firmado con el interesado. En el caso de que el recambio sea por un calefactor split eléctrico, se puede verificar el continuo y correcto uso del equipo con visitas a terreno.
Adicional	Un usuario de calefactor a leña en la ciudad de Calama y su área circundante no está obligado a cambiarlo, por lo que el mecanismo es adicional.
Permanente	Siempre y cuando se mantenga en buenas condiciones, la vida útil de un nuevo calefactor se extenderá por un tiempo al menos igual o superior a la cantidad de años que el proyecto deberá compensar sus emisiones.

Fuente: Guía de Alternativas de Compensación de Emisiones para Fuentes de Combustión (DFM, 2019) y elaboración propia.

Ventajas y desventajas

A continuación, en la Tabla 5.1-2 se listan las principales ventajas y desventajas del mecanismo de compensación presentado:

Tabla 5.1-2. Ventajas y desventajas mecanismo de compensación: recambio de calefactores

Ventajas	Desventajas
<p>a) El mecanismo genera la reducción de una fuente importante de MP2,5.</p> <p>b) Fácil implementación, seguimiento y verificación de eliminación del calefactor antiguo.</p> <p>c) Además de disminuir o eliminar la generación de contaminación a la atmósfera, mejora la calidad del aire intradomiciliario en los hogares.</p>	<p>a) Dependiendo de la cantidad de calefactores a cambiar, su costo puede ser muy elevado.</p> <p>b) Los costos de operación del nuevo calefactor pueden ser más elevados que los del antiguo, lo que podría llevar al rechazo por parte de los potenciales beneficiarios.</p> <p>c) En Calama son pocas las viviendas que utilizan calefactores a leña.</p>

Fuente: Guía de Alternativas de Compensación de Emisiones para Fuentes de Combustión (DFM, 2019) y elaboración propia

Metodología de cálculo de compensación

Para estimar la cantidad de equipos a leña antiguos que se deberán cambiar por equipos nuevos, se deberá establecer una situación base considerando un nivel de actividad determinado y una situación considerando el mecanismo seleccionado a un nivel de actividad, que podrá ser el mismo que en el caso base o uno diferente, siempre y cuando se establezcan claramente los supuestos y consideraciones para realizar los cálculos.

Luego, se deberá calcular la emisión considerando la operación del calefactor antiguo y la operación del calefactor nuevo y determinar su diferencia, para de esta forma obtener la reducción unitaria de emisiones. En el caso de que el recambio sea por calefactores eléctricos que no generan emisiones atmosféricas, la reducción unitaria será igual a la emisión unitaria del calefactor antiguo.

Finalmente, se deberán dividir las toneladas de contaminante a compensar por la reducción unitaria generada por el mecanismo para determinar la cantidad de calefactores que se deberán cambiar para dar cumplimiento al PCE, de acuerdo a lo establecido en la RCA del proyecto.

Factores de emisión

Dependiendo de la base de cálculo que se decida establecer, el factor de emisión para el uso de equipos o calefactores a leña se puede representar en diferentes tipos de unidades. Por ejemplo, en términos de masa de contaminante por unidad de tiempo de uso (g/h), en masa de contaminante por kilogramo de leña quemada (g/kg leña) o en otra unidad.

Para establecer el factor de emisión a utilizar se podrán utilizar valores debidamente

referenciados o bien realizar mediciones de emisión en terreno con un método validado de medición de emisiones, como lo es el Método CH-5G: “Determinación de las emisiones de partículas de calefactores a leña medidas desde un túnel de dilución” (ISP, 2012), realizado por una institución certificada y reconocida por la autoridad.

En el caso de utilizar valores de referencia, se podrán realizar los cálculos con los valores por defecto presentados en este banco de proyectos, o algún otro documento debidamente referenciado.

De cualquier forma, en la Tabla 5.1-3 se presenta el valor por defecto del factor de emisión para calefactor a leña para efectos de este banco de proyectos:

Tabla 5.1-3. Valor por defecto factor de emisión calefactor a leña

Artefacto a leña	FE MP2,5/MP10 (g/h)
Calefactor doble cámara grande	11,2

Fuente: Guía de Alternativas de Compensación de Emisiones para Fuentes de Combustión (DFM, 2019), a partir del documento Propuesta de medidas para el uso eficiente de la leña en la Región Metropolitana (CDT, 2012).

Niveles de actividad

Para establecer los niveles de actividad existen diferentes opciones dependiendo del nivel de información y recursos que se posean. Se presenta a continuación, documento de referencia a utilizar para determinar el nivel de actividad:

- Medición del consumo nacional de leña y otros combustibles sólidos derivados de la madera (CDT, 2015).

Además de las fuentes bibliográficas para buscar niveles de actividad, se presenta en la Tabla 5.1-4 el valor por defecto a considerar para efectos de este banco de proyectos:

Tabla 5.1-4. Valor por defecto niveles de actividad calefactores a leña

Región	Promedio h/año-equipos
Calama y área circundante	713

Fuente: uso de leña del estudio Usos finales de la Energía 2018

Consideraciones importantes

Para el mecanismo de recambio de calefactores se deberá tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- ✓ Al momento de determinar el número de calefactores a cambiar, si el resultado del cálculo da un número decimal, este se deberá aproximar al entero superior.
- ✓ En el caso de realizar el programa de recambio de calefactores por equipos que utilicen pellet como combustible y que tengan una potencia térmica nominal menor o igual a 25 kW, estos deberán estar certificados por la Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC).
- ✓ El titular que decida realizar la compensación de sus emisiones por medio de este mecanismo será el responsable asegurar la chatarrización y eliminación del calefactor

antiguo.

- ✓ Si se quieren utilizar factores de emisión a partir de mediciones, estas tendrán que seguir el Método CH-5G: “Determinación de las emisiones de partículas de calefactores a leña medidas desde un túnel de dilución” (ISP, 2012), y deberán ser realizados por una institución certificada y reconocida por la autoridad.

Plan de seguimiento

Además de los parámetros requeridos para el plan de seguimiento de un PCE presentados en el Capítulo 7 de este banco de proyectos, si se determina realizar la compensación de emisiones mediante un programa de recambio de calefactores, para dar cumplimiento al objetivo general de un plan de seguimiento, se tendrá que incluir lo que se presenta en la Tabla 5.1-5:

Tabla 5.1-5. Acreditación plan de seguimiento: recambio de calefactores

Ítem	Forma de acreditación
Acreditación de estado inicial de fuente a compensar	Listado de beneficiarios del programa de recambio de calefactores con imágenes de los calefactores antiguos a cambiar y con número de identificación de cada calefactor, el que podrá ser asignado a criterio del titular.
Acreditación de la ejecución del PCE	<p>A) Documento firmado por el/los beneficiario/s y el titular que dé cuenta de la correcta implementación del PCE. Se deberá incluir dentro de la redacción del documento la recepción conforme del nuevo calefactor, la asistencia a charla informativa que dé cuenta del motivo del PCE y de la capacitación respecto al uso del calefactor nuevo. Además, el beneficiario se comprometerá a dar un correcto uso del calefactor nuevo durante un tiempo mayor o igual al período a compensar por parte del proyecto.</p> <p>B) Con el fin de asegurar que el calefactor antiguo no será utilizado en el futuro, se deberá acreditar la eliminación del mismo. Para esto, se deberá incluir el certificado firmado por la empresa a cargo de la chatarrización, considerando el número de identificación asignado al calefactor antiguo, lo que podrá acreditarse en el mismo certificado y que se incluya una fotografía de referencia del proceso de chatarrización.</p> <p>C) Acreditar que el calefactor nuevo a instalar se encuentra en el listado de los calefactores certificados por la Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC). Lo anterior aplica para el recambio entre calefactores a leña o pellet, pero no es requisito para tecnologías cero emisión, como por ejemplo los split eléctricos.</p> <p>D) Si para el recambio de calefactores nuevos se eligen equipos cero emisión, estos deberán ser de alta eficiencia energética, cumpliendo a lo menos con el sello nivel A.</p>
Frecuencia de reportes	Se considera que es suficiente la entrega de un informe final de cumplimiento IFC, con todos los puntos anteriormente señalados, después de realizadas las sustituciones. Por lo tanto, no sería necesario realizar revisiones posteriores, pero puede quedar como recomendación, realizar una encuesta de satisfacción a los 2 años de implementada la medida.

Fuente: Guía de Alternativas de Compensación de Emisiones para Fuentes de Combustión (DFM, 2019) y elaboración propia.

Ejemplo de cálculo aplicado

Luego de obtener su RCA favorable, un proyecto debe compensar 2,0 t/año de MP10. Para compensar sus emisiones, el titular del proyecto ha decidido utilizar el mecanismo de recambio de calefactores. En este caso se ha determinado realizar el recambio de calefactores a leña antiguos por calefactores split eléctricos.

Para determinar los factores de emisión y niveles de actividad a utilizar para el cálculo, se han considerado los valores por de actividad presentados en las tablas 4 y 5. Se muestra a continuación el cálculo para el caso base, que considera un calefactor a leña de doble cámara grande (valores por defecto para factor de emisión y nivel de actividad presentados en este banco de proyectos):

$$\text{Emisión}_{\text{Caso Base}} = \text{FE}_{\text{Base}} \cdot \text{NA}_{\text{Base}}$$

$$\begin{aligned} \text{Emisión}_{\text{Caso Base}} &= 11,2 \text{ (g/h)} \times 713 \text{ (h/año - equipo)} \times 10^{-6} \text{ (t/g)} \\ &= 0,008 \text{ (t MP10 / año - equipo)} \end{aligned}$$

Luego, se presenta el cálculo para el caso con el mecanismo. Se considera que el calefactor split eléctrico no genera emisiones de material particulado fino. A partir de las emisiones calculadas, se presenta el cálculo de la reducción unitaria de emisiones y, a partir de dicho valor, el cálculo de la cantidad de calefactores a cambiar para cumplir con las toneladas totales de contaminante a compensar:

$$\text{Reducción unitaria} = \text{Emisión caso base} - \text{Emisión con mecanismo}$$

$$\text{Reducción unitaria} = 0,008 \text{ (t MP10 / año - equipo)} - 0 = 0,008 \text{ (t MP10 / año - equipo)}$$

$$\text{Calefactores a sustituir} = \text{Toneladas a compensar} / \text{Reducción unitaria}$$

$$\text{Calefactores a sustituir} = 2 \text{ (t MP10 / año)} / 0,008 \text{ (t MP10 / año - equipo)}$$

$$\text{Calefactores a sustituir} = 250 \text{ (equipos)}$$

Por otra parte, si las emisiones a compensar corresponden a MP10 resuspensión, se acepta aplicar un factor 4 respecto de las emisiones de MP10 Combustión a las cuales corresponden las emisiones de los calefactores.

Así, las toneladas a compensar equivalentes serán:

$$\text{Emisión Mp10 Equivalente} = \text{Emisión MP10 resuspensión} / 4.$$

Volviendo al ejemplo:

$$\text{Emisión MP10 Equivalente} = 2 \text{ t MP10 Resuspensión} / 4 = 0,5 \text{ t/MP10 Equivalente.}$$

$$\text{Calefactores a sustituir} = 0,5 \text{ (t MP10 / año)} / 0,008 \text{ (t MP10 / año - equipo)}$$

Calefactores a sustituir = 63 (equipos)

A partir de los cálculos realizados, el proyecto deberá realizar el recambio de 63 calefactores antiguos doble cámara por calefactores split eléctricos dentro de la ciudad de Calama y su área circundante, para así dar cumplimiento a las toneladas totales a compensar de acuerdo a su RCA.

5.2. Chatarrización de Motores

Antecedentes, referencias y justificación para su aplicación en Calama.

Esta medida de compensación de emisiones, está incluida en la Guía Compensación 2019 RM. En la ciudad de Calama existen camiones y buses de distintas características, y el inventario de la ciudad de Calama estima las emisiones de este sector en 24 t/año de MP10, por lo tanto, se visualiza factible abordar una reducción de emisiones en este sector mediante la chatarrización de motores de mayor antigüedad. Los niveles de actividad y los factores de emisión por tipo de vehículo presentados en esta metodología son aplicables a nivel nacional. Una experiencia internacional se puede encontrar en Rule 1610 – Regional Clean Air Incentives Market (RECLAIM), South Coast Air Quality Management District (2019).

Descripción del mecanismo

Este mecanismo de compensación consiste en realizar la chatarrización¹ de fuentes móviles, para así retirar de circulación vehículos antiguos con permiso de circulación vigente (dentro de la ciudad de Calama y su área circundante), que corresponden a vehículos que generan emisión de contaminación atmosférica y que están obsoletos tecnológicamente.

En la Tabla 5.2-1 se presenta el resumen de cumplimiento de criterios para este mecanismo de compensación, el cual se puede utilizar como referencia para la elaboración del informe del PCE si se selecciona este mecanismo para compensar emisiones.

¹ La chatarrización consiste en el proceso de desintegración total de un vehículo y su motor, y su posterior conversión en chatarra.

Tabla 5.2-1. Resumen cumplimiento de criterios mecanismo de compensación: chatarrización de motores

Criterio	Detalle
Medible	Las emisiones de los vehículos a chatarrizar son conocidas en base a factores de emisión y su distancia anual a recorrer se puede determinar en función de la actividad asociada al vehículo retirado
Verificable	Se podrá verificar la efectiva reducción de emisiones por medio de los certificados de chatarrización de los motores, los cuales serán parte del informe de seguimiento del mecanismo.
Adicional	Un usuario de un vehículo antiguo seguirá usándolo mientras pueda, por lo que se considera que la eliminación de motores de vehículos antiguos es un mecanismo adicional.
Permanente	Al chatarrizar un motor, este deja de ser una fuente de emisión en forma inmediata y permanente, por lo que se entiende que la rebaja de emisiones será por un tiempo superior al que un proyecto tenga que compensar sus emisiones.

Fuente: Guía de Alternativas de Compensación de Emisiones para Fuentes de Combustión (DFM, 2019) y adaptación de este informe.

Ventajas y desventajas

A continuación, en la Tabla 5.2-2 se listan las principales ventajas y desventajas del mecanismo de compensación presentado:

Tabla 5.2-2. Ventajas y desventajas mecanismo de compensación: chatarrización de motores

Ventajas	Desventajas
a) Reducción de una fuente importante de MP y NOx.	a) A medida que se vayan eliminando los vehículos antiguos, será cada vez más difícil encontrarlos, dificultando la implementación de un PCE de este tipo u obligando a la chatarrización de vehículos menos contaminantes y más caros.
b) Fácil implementación, seguimiento y verificación de eliminación del motor.	
c) Promueve la eliminación de fuentes antiguas, contribuyendo a la renovación del parque vehicular en la ciudad de Calama y su área circundante.	b) La compensación se extiende solo durante la vida útil remanente de los camiones a chatarrizar.

Fuente: Guía de Alternativas de Compensación de Emisiones para Fuentes de Combustión (DFM, 2019).

Metodología de cálculo de compensación

Factores de emisión

Para los factores de emisión se podrán utilizar valores referenciados bibliográficamente para el vehículo que se quiera chatarrizar. A modo referencial, se podrán consultar los siguientes documentos:

- Manual para el desarrollo de inventarios de emisiones atmosféricas (MMA, 2019)
- Guía para la estimación de emisiones atmosféricas en la Región Metropolitana (Seremi MA, 2020).
- EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook (EEA, 2016).

Para efectos de este banco de proyectos, se consideran como valores por defecto los factores de emisión obtenidos a partir del documento EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook (EEA, 2016). En la Tabla 5.2-3 y la Tabla 5.2-4 se presenta un resumen con los factores para contaminantes de interés para realizar compensaciones, para vehículos pesados y para buses, respectivamente:

Tabla 5.2-3. Resumen factores de emisión por defecto para vehículos pesados²

Tipo		MP10	MP2,5	SO2
Unidad	Tecnología	g/km	g/km	g/km
Diesel 7,5 – 16 t	Convencional	0,3344	0,3344	0,0055
	EURO I - 91/542/EEC I	0,2010	0,2010	0,0047
	EURO II - 91/542/EEC II	0,1040	0,1040	0,0047
	EURO III - 2000	0,0881	0,0881	0,0047
	EURO IV - 2005	0,0161	0,0161	0,0047
	EURO V - 2008	0,0161	0,0161	0,0047
	EURO VI	0,0008	0,0008	0,0047
Diesel 16 - 32 t	Convencional	0,4180	0,4180	0,0075
	EURO I - 91/542/EEC I	0,2970	0,2970	0,0063
	EURO II - 91/542/EEC II	0,1550	0,1550	0,0063
	EURO III - 2000	0,1300	0,1300	0,0063
	EURO IV - 2005	0,0239	0,0239	0,0063
	EURO V - 2008	0,0239	0,0239	0,0063
	EURO VI	0,0012	0,0012	0,0063
Diesel >32 t	Convencional	0,4910	0,4910	0,0089
	EURO I - 91/542/EEC I	0,3580	0,3580	0,0075
	EURO II - 91/542/EEC II	0,1940	0,1940	0,0075
	EURO III - 2000	0,1510	0,1510	0,0075
	EURO IV - 2005	0,0268	0,0268	0,0075
	EURO V - 2008	0,0268	0,0268	0,0075
	EURO VI	0,0013	0,0013	0,0075

Fuente: Guía para la estimación de emisiones atmosféricas en la Región Metropolitana (Seremi MA, 2020), a partir de la tabla 3-21 y 3-22 del capítulo 1.A.3.b Road Transport del documento EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook (EEA - 1.A.3.b, 2019c).

² Los factores se presentan con exactamente la misma cantidad de decimales que presenta la fuente.

Tabla 5.2-4. Resumen factores de emisión por defecto para buses³

Tipo		MP10	MP2,5	SO2
Unidad	Tecnología	g/km	g/km	g/km
Buses urbanos estándar	Convencional	0,9090	0,9090	0,0110
	EURO I - 91/542/EEC I	0,4790	0,4790	0,0090
	EURO II - 91/542/EEC II	0,2200	0,2200	0,0090
	EURO III - 2000	0,2070	0,2070	0,0090
	EURO IV - 2005	0,0462	0,0462	0,0090
	EURO V - 2008	0,0462	0,0462	0,0090
	EURO VI	0,0023	0,0023	0,0090
Buses interurbanos estándar	Convencional	0,4700	0,4700	0,0079
	EURO I - 91/542/EEC I	0,3620	0,3620	0,0074
	EURO II - 91/542/EEC II	0,1650	0,1650	0,0074
	EURO III - 2000	0,1780	0,1780	0,0074
	EURO IV - 2005	0,0354	0,0354	0,0074
	EURO V - 2008	0,0354	0,0354	0,0074
	EURO VI	0,0018	0,0018	0,0074

Fuente: Guía para la estimación de emisiones atmosféricas en la Región Metropolitana (Seremi MA, 2020), a partir de la tabla 3-23 y tabla 3-24 del capítulo 1.A.3.b Road Transport del documento. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook (EEA - 1.A.3.b, 2019c).

Niveles de actividad

Los niveles de actividad para las fuentes móviles pueden ser determinados a partir de la distancia total recorrida por el o los vehículos en un período de tiempo determinado. Si por ejemplo se determina chatarrizar buses o camiones, habrá que determinar la cantidad de kilómetros al año que recorren.

Si no se tiene información de los vehículos que efectivamente se van a chatarrizar, a modo referencial se podrán consultar los siguientes documentos:

- Manual para el desarrollo de inventarios de emisiones atmosféricas (MMA, 2019).
- Diseño de metodologías de compensación de emisiones para chatarrización de fuentes móviles (DICTUC, 2009).
- Diseño integral de un programa de chatarrización de camiones (Centro Mario Molina, 2009).

Para efectos de este banco de proyectos, se consideran como valores por defecto los niveles de actividad obtenidos partir del Manual para el desarrollo de inventarios de emisiones atmosféricas (MMA, 2019). En la Tabla 5.2-5 se presentan dichos valores:

³ Los factores se presentan con exactamente la misma cantidad de decimales que presenta la fuente.

Tabla 5.2-5. Resumen niveles de actividad por defecto para fuentes móviles

Tipo de Vehículo	Nivel de Actividad (km/veh)
Camiones livianos	26.657
Camiones medianos	39.180
Camiones pesados	48.700
Buses	69.848

Fuente: Tabla 4-8 del Manual para el desarrollo de inventarios de emisiones atmosféricas (MMA, 2019).

Consideraciones importantes

De acuerdo al documento Programa piloto para el sistema de compensaciones de la Región Metropolitana – Diseño de metodologías de compensación de emisiones para chatarrización de fuentes móviles (Conama, 2009), al realizar la compensación de emisiones mediante la chatarrización de fuentes móviles se supone que el vehículo chatarrizado será reemplazado por un vehículo nuevo. Dicha suposición considera que se mantiene constante el stock de vehículos de la Región Metropolitana, dado que, aunque probablemente el dueño del vehículo original puede comprar uno de segunda mano, finalmente se producirá la entrada de un vehículo nuevo al parque. Este supuesto también considera que el dueño del vehículo a chatarrizar no cambia de modo de transporte ni que utiliza otro vehículo de su propiedad en su reemplazo. Considerando lo anterior, para efectos de cálculo se podrá considerar que el vehículo chatarrizado se cambia por un vehículo moderno de similares características, aun cuando no sea el mismo vehículo que va adquirir el propietario del camión antiguo. Este supuesto se puede también aplicar para el caso de la ciudad de Calama y su área circundante.

Tal como se indica en la introducción de este capítulo, se puede aplicar un factor 3 entre MP10 de resuspensión y MP10 de combustión.

Plan de seguimiento

Además de los parámetros requeridos para el plan de seguimiento de un PCE presentados en el Capítulo 7 de este banco de proyectos, si se determina realizar la compensación de emisiones mediante la chatarrización de motores para dar cumplimiento al objetivo general de un plan de seguimiento, se deberá incluir lo que se presenta en la

Tabla 5.2-6:

Tabla 5.2-6. Acreditación plan de seguimiento: Chatarrización de motores

Ítem	Forma de acreditación
Acreditación de estado inicial de fuente a compensar	<p>A) Listado de vehículos a chatarrizar y su vigencia, es decir, verificar que las características del vehículo a eliminar coincidan con lo que se presentó en el cálculo teórico (año, tecnología, etc.).</p> <p>B) Acreditar la compra del vehículo a chatarrizar por parte del titular, mediante:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Copia simple del contrato de compra venta del vehículo. En dicho documento aparecerá el nombre del titular del proyecto como comprador. En su defecto podrá aparecer la empresa mandatada por el titular para la ejecución del PCE. De ser este el caso, se deberá presentar un documento legalizado en que se acredite la tercerización del servicio. – Inscripción de la transferencia de dominio del vehículo a nombre del titular del proyecto en el Registro Nacional de Vehículos Motorizados. – Permiso de circulación del vehículo, de al menos el último año en la ciudad de Calama y su área circundante. – Certificado de revisión técnica, de al menos el último año y vigente a la fecha de la compra del vehículo.
Acreditación de la ejecución del PCE	<p>Se deberá acreditar la eliminación del motor del vehículo a chatarrizar, mediante:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Certificado de Inscripción y Anotaciones Vigentes del Registro Nacional de Vehículos Motorizados, en que conste la cancelación de la inscripción por desarme del vehículo. – Acreditación de la destrucción del vehículo y su motor, mediante contrato que individualiza el vehículo con empresa que realiza la eliminación (desarmaduría, fundición y/o chatarrización). – Fotografías del proceso de eliminación del vehículo antes y después de su chatarrización. Cada fotografía será acompañada por un periódico de circulación nacional para acreditar las fechas respectivas asociadas al día de llegada del vehículo al lugar de destrucción y la fecha del día en que fue eliminado. La fotografía debe mostrar la placa patente del vehículo eliminado.
Frecuencia de reportes	<p>Se considera que es suficiente la entrega de un informe final de cumplimiento IFC, considerando todos los puntos anteriormente señalados, después de realizadas las chatarrizaciones. Por lo tanto, no se considera necesario realizar revisiones posteriores.</p>

Fuente: Guía de Alternativas de Compensación de Emisiones para Fuentes de Combustión (DFM, 2019) y elaboración propia.

Una vez acreditada la eliminación de la fuente de emisiones reemplazada (los motores chatarrizados), no se considera necesario generar reportes adicionales como parte del seguimiento, por lo tanto, bastará con un solo informe de cumplimiento a entregar una vez realizados todas las chatarrizaciones de motores comprometida.

Ejemplo de cálculo aplicado

Un proyecto luego de obtener su RCA favorable debe compensar un total de 3 (t/año) de (MP₁₀) de resuspensión.

La emisión equivalente en MP₁₀ Combustión es $E = 3/3 = 1$ t/año.

Para compensar sus emisiones, el titular del proyecto ha decidido utilizar el mecanismo

de chatarrización de motores. En este caso, se ha determinado realizar la chatarrización de camiones pesados diesel convencionales sin norma de emisión⁴.

Para realizar una estimación de compensación conservadora, se trabaja bajo el supuesto de que al chatarrizar un camión, se estará renovando la flota vehicular en la ciudad de Calama y su área circundante, y consecuentemente se asume el ingreso de un camión nuevo a la flota.

De esta forma, para el cálculo se considera que por cada camión diésel pesado convencional sin norma de emisión entrará a la flota vehicular, por acción de un tercero, un camión pesado diésel con norma de emisión EURO VI.

Los factores de emisión de este tipo de vehículos, se han obtenido de la tabla 3-21 del capítulo 1.A.3.b “Passenger cars, light commercial trucks, heavy-duty vehicles including buses and motorcycles” del documento EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook (EEA - 1.A.3.b, 2016), los que corresponden a factores estimados con la metodología Tier 2.

Para determinar los factores de emisión se utilizan los valores por defecto presentados en la Tabla 5.2-3, se consideran camiones con un peso entre 16 y 32 toneladas, siendo 0,418 g MP10 / km y 0,0012 g MP10 / km los factores para un camión convencional y un camión EURO VI, respectivamente.

Para la determinación de los niveles de actividad, se ha considerado la tabla 4-8 del Manual para el desarrollo de inventarios de emisiones atmosféricas (MMA, 2017), en la cual se establece que un camión pesado recorre un total aproximado de 48.700 (km/año), el que corresponde al valor por defecto presentado en la Tabla 5.2-5 de este banco de proyectos. Este nivel de actividad se mantendrá constante para ambos tipos de vehículos.

A partir de los factores de emisión y nivel de actividad presentados, se muestra a continuación el cálculo para el caso base, que considera la emisión de un camión pesado diésel convencional:

$$\text{Emisión}_{\text{Caso Base}} = \text{FE}_{\text{Base}} \cdot \text{NA}_{\text{Base}}$$

$$\text{Emisión}_{\text{Caso Base}} = 0,418 \text{ (g MP}_{10}\text{/km)} \times 48.700 \text{ (km/año)} \times 10^{-3} \text{ (Kg/g)} = 20,3566 \text{ (Kg MP}_{10}\text{/año - equipo)}$$

Luego, se presenta el cálculo para el caso con mecanismo, que considera la emisión de un camión diésel EURO VI:

$$\text{Emisión}_{\text{Con Mecanismo}} = \text{FE}_{\text{Con Mecanismo}} \cdot \text{NA}_{\text{Con Mecanismo}}$$

$$\text{Emisión}_{\text{Con Mecanismo}} = 0,0012 \text{ (g MP}_{10}\text{/km)} \times 48.700 \text{ (km/año)} \times 10^{-3} \text{ (Kg/g)} = 0,0584 \text{ (Kg MP}_{10}\text{/año - equipo)}$$

A partir de las emisiones calculadas, se presenta el cálculo de la reducción unitaria de emisiones:

⁴ Corresponden a camiones pesados con peso bruto superior a 16 toneladas, cuya fecha de inscripción en el Registro de Vehículos Motorizados es anterior a septiembre de 1994.

Reducción unitaria = Emisión caso base – Emisión con mecanismo

Reducción unitaria = 20,3566 (Kg MP10 /año - equipo) - 0,0584 (Kg MP10 /año - equipo)

Reducción unitaria = 0,02 (t MP10 /año - equipo)

En base al cálculo presentado, se establece que por cada camión chatarrizado se generará una reducción de 0,02 toneladas de MP10 al año. A continuación, se calcula la cantidad de camiones a chatarrizar:

Camiones a chatarrizar = Toneladas a compensar / Reducción unitaria

Camiones a chatarrizar = 1 (t MP10 combustión eq/año) / 0,02 (t MP10/año - camión)

Camiones a chatarrizar = 50 (camiones)

A partir de los cálculos realizados, el proyecto deberá realizar la chatarrización de 148 camiones pesados diésel convencional (sin norma de emisión) para así dar cumplimiento a las toneladas totales a compensar de acuerdo a su RCA de 3 t/año de MP10 resuspensión.

5.3. Reducción de Emisiones en Calderas, Fuentes Fijas Industriales y/o Comerciales

Antecedentes, referencias y justificación para su aplicación en Calama.

Esta medida de compensación de emisiones, es de elaboración propia incorporando elementos de la Guía Compensación 2019 RM. En la ciudad de Calama existen calderas y procesos industriales y por lo tanto les puede ser aplicable esta alternativa. La mayor precaución a considerar es que la línea de base ya no puede ser la situación actual antes del límite de emisión establecido en el PDA, sino que debe considerarse la reducción desde el nivel de cumplimiento de este límite, aspecto que se aborda con el ejemplo que se desarrolla en este sub capítulo. La compensación entre fuentes fijas es siempre una buena alternativa, ya que, a diferencia de abordar fuentes móviles o sector residencial, se logra la reducción deseada con la intervención de una fuente y no de varias como son los casos anteriores.

Descripción del mecanismo

El mecanismo consiste en reducir las emisiones de una caldera o una fuente fija en general, ya sea instalando filtros de MP y/o SO₂ en las fuentes fijas industriales y/o comerciales, o bien realizando un cambio de combustible, por ejemplo, de carbón a gas con el fin de disminuir sus emisiones atmosféricas. Para este caso aplican fuentes como grupos electrógenos, hornos, calderas, entre otros.

En la Tabla 5.3-1 se presenta el resumen de cumplimiento de criterios para este mecanismo de compensación, el cual se puede utilizar como referencia para la elaboración del informe del PCE si se selecciona este mecanismo para compensar emisiones.

Tabla 5.3-1. Resumen cumplimiento de criterios mecanismo de compensación: filtros para fuentes fijas industriales y/o comerciales

Criterio	Detalle
Medible	Se pueden realizar mediciones directamente en la fuente.
Verificable	Se pueden realizar mediciones antes y después de instalar un filtro en una fuente fija, o del cambio a un combustible limpio, con el fin de verificar la reducción efectiva de emisiones.
Adicional	Si no existe una obligación de instalar un filtro en la fuente fija seleccionada, se asume que el mecanismo es adicional. En caso de aplicar un límite de emisión establecido por el PDA, la adicionalidad sería considerando la reducción de emisiones lograda por debajo de este límite.
Permanente	Se espera que el sistema de filtro, o el cambio de combustible limpio, a instalar quede en forma permanente en la fuente, superando así el período en que el proyecto está obligado a compensar sus emisiones.

Fuente: Elaboración propia

Ventajas y desventajas

A continuación, en la Tabla 5.3-2 se listan las principales ventajas y desventajas del mecanismo de compensación presentado:

Tabla 5.3-2. Ventajas y desventajas mecanismo de compensación: filtros para fuentes fijas industriales y/o comerciales

Ventajas	Desventajas
<p>a) El seguimiento de este tipo de mecanismo resulta sencillo, toda vez que se instala sobre una fuente fija de fácil fiscalización.</p> <p>b) Existen tecnologías y métodos validados para realizar mediciones antes y después de la implementación del mecanismo.</p> <p>c) El mecanismo muy probablemente permanecerá instalado por un tiempo mayor al que el proyecto tenga que compensar sus emisiones.</p> <p>d) en el caso de cambiar de combustible sólido a líquido o gas, se simplifica la operación en el manejo del combustible (transporte y almacenamiento)</p>	<p>a) La aplicación se circunscribe a la existencia de una fuente de emisión de una industria o institución particular, lo que dificulta la gestión de la implementación de la medida a un número limitado de fuentes existentes</p> <p>b) La operación de un sistema de filtro requiere de mantenimiento y recambio, lo cual significa operarios dedicados a aquello.</p> <p>c) el cambio a un combustible limpio es de mayor costo al de un combustible sólido.</p> <p>d) la reducción de emisiones a reconocer puede ser menor si la fuente está sujeta a un límite de emisión por el PDA respectivo.</p>

Fuente: Elaboración propia

Metodología de cálculo de compensación

Factores de emisión

Para el caso de las fuentes fijas industriales y/o comerciales existentes, se priorizará realizar mediciones directamente en la fuente previamente a la instalación del filtro, considerando para ello una empresa certificada por la autoridad (ETFA) que realice sus mediciones bajo un estándar validado.

En el caso de que se planifique incorporar el mecanismo en una fuente a instalar en el marco del proyecto que necesite compensar sus emisiones, deberá referenciar las emisiones en base a datos del fabricante o bien en base a referencias bibliográficas.

Niveles de actividad

En cuanto a los niveles de actividad, deberán establecerse en base a información de operación real del titular de la fuente de emisión donde se implemente este mecanismo de compensación. En el caso de calderas, la presentación de facturas de compra del

combustible en los últimos 3 años, permitirá determinar las horas anuales efectivamente trabajadas por la fuente de emisión.

Consideraciones importantes

- Las mediciones en la fuente fija se deberán realizar bajo el método CH-5 “Determinación de las emisiones de partículas desde fuentes estacionarias, y realizadas por una empresa ETFA.
- Si la fuente está sujeta a un límite de emisión según D.S. N°5/2021, la reducción de emisiones debe determinarse desde este límite.
- Tal como se indica en la introducción de este capítulo, se puede aplicar un factor 3 entre MP10 de resuspensión y MP10 de combustión.
- En caso de SO₂, de acuerdo a lo indica en la introducción de este capítulo, se puede aplicar un factor de 0,2 t/año para 1 ton de SO₂ respecto a 1 ton de MP10 combustión.

Plan de seguimiento

Se deberá incluir lo que se presenta en la Tabla 5.3-3

Tabla 5.3-3. Acreditación plan de seguimiento: Filtros para fuentes fijas industriales y/o comerciales o cambio a combustible limpio

Ítem	Forma de acreditación								
Acreditación de estado inicial de fuente a compensar	Descripción de la fuente fija donde se instalará el filtro, considerando número de registro, fotos referenciales, medición del contaminante a compensar a realizar por entidad ETFA.								
Acreditación de la ejecución del PCE	Medición oficial a realizar por entidad ETFA, del contaminante comprometido.								
Acreditación de la eficiencia del mecanismo	Se entregará informe con los resultados de las mediciones antes de filtro y después de filtro, o bien con el combustible inicial y después con el combustible limpio, indicando la reducción de emisiones lograda y comparando con los límites comprometidos.								
Frecuencia de reportes	<p>Se considera que además de la entrega de un informe final de cumplimiento IFC, considerando todos los puntos anteriormente señalados, se deben presentar informes anuales de cumplimiento los cuales deben respetar las frecuencias de medición indicadas en el D.S. N°5/2021. Esta frecuencia de medición está indicada en la tabla 8 del artículo 5 del D.S. ya señalado:</p> <p>Tabla 8: Periodicidad mediciones discretas por tipo de calderas</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Tipo de combustible</th> <th>Frecuencia de medición</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Sólido</td> <td>Cada 6 meses</td> </tr> <tr> <td>Líquido</td> <td>Cada 12 meses</td> </tr> <tr> <td>Gas</td> <td>Cada 12 meses</td> </tr> </tbody> </table>	Tipo de combustible	Frecuencia de medición	Sólido	Cada 6 meses	Líquido	Cada 12 meses	Gas	Cada 12 meses
Tipo de combustible	Frecuencia de medición								
Sólido	Cada 6 meses								
Líquido	Cada 12 meses								
Gas	Cada 12 meses								

Fuente: Elaboración propia.

Ejemplo de cálculo aplicado

Como ejemplo, se considera una caldera a carbón que presenta las características indicadas en la siguiente tabla, con niveles de emisión antes de entrar en vigencia los nuevos límites de emisión del PDA Calama.

Tabla emisiones caldera a carbón antes de la compensación

Parámetro	Unidad	Valor
Potencia	MWt	8,3
Funcionamiento	horas/año	4.224
Consumo Comb.	kg/h	1.099
Caudal de Gases	m ³ N/h	17.592
F. Emisión SO _x	kg Emisión/kg Comb	0,0551
F. Emisión MP 10	kg Emisión/kg Comb	0,008
Concentración SO _x	mg/m ³ N	3400
Concentración MP10	mg/m ³ N	500
Emisión SO _x	kg/h	60,6
Emisión MP	kg/h	8,8
Emisión SO _x	ton/año	218,1
Emisión MP	ton/año	31,7

Considerando el D.S. N°5/2021, la reducción de emisiones a reconocer debe ser por debajo de los límites establecidos en tabla 7, artículo 4:

Artículo 4. Las calderas existentes y nuevas, de potencia térmica nominal mayor o igual a 1 MWT¹⁰, deberán cumplir con los límites máximos de emisión que se establecen en la siguiente tabla:

Tabla 7: Límites de emisión calderas nuevas y existentes.

Estado del combustible	MP (mg/m ³ N)						SO ₂ (mg/m ³ N)						NO _x (mg/m ³ N)							
	≥1 y <3 MWt		≥3 y <20 MWt		≥ 20 MWt		≥1 y <3 MWt		≥3 y <20 MWt		≥ 20 MWt		≥1 y <3 MWt		≥3 y <20 MWt		≥ 20 MWt			
	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E		
Gaseoso	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	100	NA	100	NA	100	NA
Líquido	30	50	30	50	20	30	400	NA	400	NA	400	NA	200	NA	200	NA	200	NA	NA	
Sólido	50	75	50	50	30	50	400	NA	400	NA	400	400	300	NA	300	NA	300	NA	NA	

NA: No aplica
 N: Caldera nueva
 E: Caldera existente

Dado que la caldera es una fuente existente de 8,3 MWt, deberá cumplir el límite de emisión de MP de 50 mg/m³N. Respecto su emisión de SO₂ y NO_x no le aplica ningún límite.

Según lo anterior, la empresa considera adquirir un filtro de MP que logre disminuir sus emisiones para cumplir el límite establecido en el PDA y que, a su vez, genere una disminución de emisiones por debajo de este límite para que sean consideradas como una

medida de compensación. Por lo tanto, se propone utilizar un filtro para lograr emisiones de 10 mg/m³N de MP10, pero para dejar una holgura para el control de cumplimiento, se compromete disminuir sus emisiones a 15 mg/m³N de MP10.

El caudal de gases se mantiene en 17.592 m³N/h.

Emisión de línea base antes de entrada en vigencia PDA (no aplica) = 500 mg/m³N x 17.592 x 4.224 = 37,2 t/año

Emisión de línea base = 50 mg/m³N x 17.592 x 4.224 = 3,7 t/año

Emisión a comprometer con sistema de filtro = 15 mg/m³N x 17.592 x 4.224 = 1,1 t/año.

Reducción de emisiones a reconocer como de compensación: 3,7 t/año – 1,1 t/año = 2,6 t/año.

Si se requiere compensar emisiones de MP10 resuspensión, las 2,6 t/año de MP10 combustión equivalen a 2,6 x 3 = 10,4 t/año MP10 resuspensión.

Si el ejemplo fuese en vez de un filtro cambiar la caldera a gas, para la misma cantidad de energía, tendría un caudal de un 30% inferior. Además, podría comprometer 7 mg/m³N de MP con seguridad de alcanzar ese nivel de concentración.

Así, la emisión a comprometer sería:

E (t/año) = 7 mg/m³N x 12.315 x 4.224 = 0,4 t/año.

Reducción de emisiones a reconocer MP Combustión: 3,7 t/año – 0,4 t/año = 3,3 t/año.

Si se requiere compensar emisiones de MP10 resuspensión, las 3,3 t/año de MP10 combustión equivalen a 3,3 x 3 = 9,9 t/año MP10 resuspensión.

Pero la mayor reducción de emisiones a lograr sería en SO₂, ya que en este caso la caldera existente no tiene límite de emisión.

Emisión de línea base SO₂ = 3.400 mg/m³N x 17.592 mg/m³N x 4.224 = 252,6 t/año.

La caldera a gas, para la misma cantidad de energía, tendría un caudal de un 30% inferior. Además, podría comprometer 7 mg/m³N de SO₂ con seguridad de alcanzar ese nivel de concentración.

Así, la emisión a comprometer sería:

E SO₂ (t/año) = 7 mg/m³N x 12.315 x 4.224 = 0,4 t/año.

Reducción de emisiones a reconocer SO₂: 252,6 t/año – 0,4 t/año = 252,2 t/año.

Dado que en Calama no se ha establecido un factor, se propone aplicar por defecto un factor más conservador de 0,2 t/año de MP10 por tonelada de SO₂, de acuerdo a lo señalado en el inicio de este capítulo 5.

Así, la reducción de emisiones en MP10 equivalente sería: 252,2 x 0,2 = 50,4 t/año MP10.

5.4. Filtros DPF Para Fuentes Móviles

Antecedentes, referencias y justificación para su aplicación en Calama.

Esta medida de compensación de emisiones, está incluida en la Guía Compensación 2019 RM. En la ciudad de Calama existen camiones y buses de distintas características, y el inventario de la ciudad de Calama estima las emisiones de este sector en 24 t/año de MP10, por lo tanto, se visualiza factible abordar una reducción de emisiones en este sector mediante la instalación de filtros DPF. Los niveles de actividad y los factores de emisión por tipo de vehículo presentados en esta metodología son aplicables a nivel nacional. Una experiencia internacional se puede encontrar en Rule 1612 - Regional Clean Air Incentives Market (RECLAIM), South Coast Air Quality Management District (2019).

Descripción del mecanismo

Este mecanismo consiste en instalar filtros DPF (del inglés diesel particulate filter) a fuentes móviles que no los tengan, tales como camiones, buses o maquinaria fuera de ruta. El objetivo es lograr el abatimiento de material particulado generado por la combustión de los motores de dichas fuentes de emisión.

Los filtros DPF comúnmente están hechos de cordierita ($2\text{MgO}-2\text{Al}_2\text{O}_3-5\text{SiO}_2$) o de carburo de silicio (SiC), en una estructura con una forma similar a un panal de abejas con los canales de circulación bloqueados a ambos extremos.

El flujo de salida de la combustión del motor, al pasar por el filtro, fuerza al material particulado a través de las paredes porosas del sustrato, las que actúan como un filtro mecánico. Al pasar las partículas de hollín a través del filtro, se transportan a través de las paredes porosas por difusión, donde finalmente quedan adheridas. El filtro está hecho de canales cuadrados paralelos, con un espesor típicamente entre los 300-400 μm . El diseño del filtro contempla una porosidad óptima, que permita el paso de los gases de escape del motor sin mayores obstáculos y que, al mismo tiempo, tenga la capacidad de retener las partículas sólidas.

A medida que se utiliza la fuente móvil, el filtro va acumulando material particulado. Si el filtro se satura se genera una contrapresión que puede ser perjudicial para el funcionamiento del motor, ya que puede aumentar el consumo de combustible, puede fallar el motor y puede perjudicar al mismo filtro. Para prevenir estos inconvenientes, este se debe regenerar quemando el material particulado retenido. Para estos efectos, existen dos tipos de regeneración del filtro DPF (Reşitoğlu, Altinişik, & Keskin, 2015):

- **Regeneración activa:** el hollín retenido en el filtro se remueve en un proceso de oxidación controlada con oxígeno (O_2) a 550°C . El calor requerido para llevar a cabo este proceso se suministra con una fuente externa (un calefactor eléctrico o un soplete). Las partículas capturadas en el filtro se queman cuando la carga de hollín en este alcanza un límite (alrededor del 45%) indicado por la caída de presión a través del filtro.
- **Regeneración pasiva:** la oxidación del material particulado se lleva a cabo a la

temperatura del gas de escape de salida por medio de una reacción catalítica que no utiliza ningún combustible adicional. En un rango de temperatura entre los 200°C y los 450°C, bajas cantidades de NO₂ promueven la oxidación continua de las partículas de carbono.

El tipo de fuente móvil objetivo de este mecanismo corresponde a flotas de buses o camiones. El mecanismo ayudará a reducir las emisiones de contaminantes atmosféricos de este tipo de fuentes móviles mientras se produce el recambio de la flota dentro de la ciudad de Calama y su área circundante.

En la Tabla 5.4-1 se presenta el resumen de cumplimiento de criterios para este mecanismo de compensación, el cual se puede utilizar como referencia para la elaboración del informe del PCE si se selecciona este mecanismo para compensar emisiones.

Tabla 5.4-1. Resumen cumplimiento de criterios mecanismo de compensación: filtros DPF para fuentes móviles

Criterio	Detalle
Medible	Es factible realizar mediciones directamente en la fuente donde se instalará el filtro DPF, específicamente en el Centro de Control y Certificación Vehicular (3CV). Estos valores pueden ser aplicados en Calama sin necesidad de realizar nuevas mediciones.
Verificable	Se podrá verificar la instalación del filtro en la fuente.
Adicional	Si la regulación no establece que la fuente móvil sobre la cual se aplicará el filtro que debe tenerlo, se considera un mecanismo de compensación adicional.
Permanente	Siempre y cuando se realicen buenas mantenciones a los filtros, estos pueden tener una larga vida útil que se puede extender por un período mayor al que un proyecto deba compensar emisiones.

Fuente: Guía de Alternativas de Compensación de Emisiones para Fuentes de Combustión (DFM, 2019) y elaboración propia.

Ventajas y desventajas

A continuación, en la Tabla 5.4-2 se listan las principales ventajas y desventajas del mecanismo de compensación presentado:

Tabla 5.4-2. Ventajas y desventajas mecanismo de compensación: filtros DPF para fuentes móviles

Ventajas	Desventajas
<p>a) El mecanismo genera la reducción de una importante fuente de material particulado.</p> <p>b) Este mecanismo tiene amplia aplicabilidad en la flota vehicular actual, que probablemente siga en circulación por los próximos años.</p>	<p>a) Para que su implementación sea efectiva, se deberán instalar filtros en un número elevado de fuentes móviles, las cuales idealmente deberán tener características similares para facilitar su implementación.</p> <p>b) La mantención del filtro —y con ello su eficiencia— depende del usuario final, por lo que si este no entiende cómo funciona, es probable que los procesos de regeneración del filtro, cuando se encuentre saturado, no se lleven a cabo de manera correcta.</p> <p>c) El seguimiento y fiscalización de la eficiencia real de esta medida resultan complejos.</p>

Fuente: Guía de Alternativas de Compensación de Emisiones para Fuentes de Combustión (DFM, 2019).

Metodología de cálculo de compensación

Factores de emisión

Los factores de emisión podrán ser referenciados bibliográficamente, o bien ser establecidos a partir de mediciones en las mismas fuentes móviles sobre las cuales se quiera implementar los filtros DPF.

Se podrán considerar como valores por defecto para los factores de emisión los presentados en la Tabla 5.2-3 y la Tabla 5.2-4 de este banco de proyectos.

La siguiente tabla, presenta nivel de eficiencia lograda para sistemas de Post Tratamiento de Emisiones, certificados.

Tabla 5.4-3. Acreditación Nivel de eficiencia lograda para sistemas de Post Tratamiento de Emisiones, certificados.

Identificación Sistema de Post Tratamiento de Emisiones			Nivel de Eficiencia	
Marca	Modelo / Tipo	Certificado N°	Pruebas Iniciales %	Pruebas Finales %
Donaldson	DPM-DPF con Catalizador de Serie 6300/ DPX, Medio filtrante: monolito de cordierita/ Método de Regeneración: pasivo mediante filtro catalizador	0010	89	86
Engine Control System (Unicat)	SC17H, Purifilter, Medio filtrante: Pared de Carburo Silicio/Método de Regeneración: pasivo mediante revestimiento catalítico	0011	96	99
Volvo	CRT, Número de parte 20562619 / DPF-CRT medio filtrante cordierita, método de regeneración pasivo con catalizador de platino mediante revestimiento catalítico	0012	87	90
FeelPure	FBC (Fuel Borne Catalyst), medio filtrante carburo silicio (SiC), método de regeneración pasivo mediante uso de aditivo catalizador CAM FBC	0013	94	92
Donaldson	DPF Muffler Estilo 6, número de serie: DPF005058/ DPF DPM, medio filtrante sustrato de cerámica, método de regeneración pasivo mediante recubrimiento catalítico	0014	92	93
Volvo	CRT, Número de parte 20562619 / DPF-CRT medio filtrante cordierita, método de regeneración pasivo con catalizador de platino mediante revestimiento catalítico	0015	92	92

Fuente: Link de descarga de tabla con el listado de sistemas de postratamiento de emisiones certificados: <https://www.mtt.gob.cl/archivos/5601>

Niveles de actividad

Los niveles de actividad para las fuentes móviles pueden ser determinados a partir de la distancia total recorrida por el o los vehículos en un período de tiempo determinado. Si por ejemplo se determina implementar filtros DPF en buses o camiones, habrá que determinar la cantidad de kilómetros al año que recorren.

Por otro lado, si los filtros DPF se piensan implementar en maquinaria fuera de ruta, el nivel de actividad estará determinado por la cantidad de horas al año que se utiliza la maquinaria.

Se podrán considerar como valores por defecto para los niveles de actividad para las fuentes móviles los presentados en la Tabla 5.2-5 de este banco de proyectos.

Consideraciones importantes

- ✓ La efectividad real del mecanismo radica en el buen cuidado del filtro DPF por parte del usuario del vehículo donde se instale, por lo que resulta clave informar al usuario cómo cuidar de este para que sepa cuando es necesario realizar la regeneración del filtro en el caso de que este se tape.
- ✓ Actualmente en Chile existen empresas que prestan el servicio de retirar los filtros DPF de los vehículos, argumentando que no tienen buen funcionamiento y que el vehículo aun sin el filtro cumple con lo exigido en la revisión técnica. Este punto

es importante a considerar, ya que no está clara la cantidad de vehículos que traen de fábrica el sistema DPF incorporado y son retirados por los usuarios. Esto puede ocurrir al implementar los filtros en un vehículo en el marco de un PCE, por lo que el seguimiento de la implementación de este mecanismo resulta clave.

- ✓ Tal como se indica en la introducción de este capítulo, se puede aplicar un factor 3 entre MP10 de resuspensión y MP10 de combustión.

Plan de seguimiento

Además de los parámetros requeridos para el plan de seguimiento de un PCE presentados en el Capítulo 7 de este banco de proyectos, si se determina realizar la compensación de emisiones mediante la instalación de filtros DPF para fuentes móviles, para dar cumplimiento al objetivo general de un plan de seguimiento, se deberá incluir lo que se presenta en la Tabla 5.4-4

Tabla 5.4-4. Acreditación plan de seguimiento: Filtros DPF para fuentes móviles

Ítem	Forma de acreditación
Acreditación de estado inicial de fuente a compensar	Listado de vehículos o maquinarias donde se instalarán los filtros DPF y su vigencia, es decir, verificar que las características del vehículo o la maquinaria coinciden con lo que se declaró en el PCE (año, tecnología, etc.).
Acreditación de la ejecución del PCE	A) Con el fin de asegurar que el filtro DPF instalado sea capaz de cumplir su función, se deberá incluir el certificado de fábrica del filtro DPF, validado por el Centro de Control y Certificación Vehicular (3CV). B) Certificado firmado por el/los beneficiario/s y el titular que dé cuenta de la correcta implementación del PCE. Se deberá incluir dentro de la redacción del certificado la recepción conforme de la instalación del filtro, la asistencia a charla informativa que dé cuenta del motivo del PCE y de la capacitación respecto al uso del filtro nuevo y su correcta mantención. Además, el beneficiario se comprometerá a dar un correcto uso del filtro nuevo durante un tiempo mayor o igual al período a compensar por parte del proyecto.
Frecuencia de reportes	Se considera que además de la entrega de un informe final de cumplimiento IFC, con todos los puntos anteriormente señalados, después de realizadas las instalaciones de los filtros DPF, se debe realizar reportes anuales, para verificar la mantención y uso de los filtros.

Fuente: Guía de Alternativas de Compensación de Emisiones para Fuentes de Combustión (DFM, 2019) y elaboración propia

Ejemplo de cálculo aplicado

Ejemplo 1

Un proyecto debe compensar un total de 2 t/año de MP10 por combustión. Para compensar sus emisiones el titular ha decidido implementar filtros DPF en una flota de buses estándar urbanos de la ciudad de Calama y su área circundante.

Para realizar los cálculos, se consideran buses del transporte público con normativa de emisión EPA98 o EURO III.

En el caso del factor de emisión para este tipo de vehículos, se ha considerado el valor por defecto obtenido de la tabla 5.2-4 del presente informe, elaborada a partir tabla 3-24 del capítulo 1.A.3.b “Passenger cars, light commercial trucks, heavy-duty vehicles including buses and motorcycles” del documento EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook (EEA - 1.A.3.b, 2016), el que corresponde a un factor estimado con la metodología Tier 2. El factor corresponde a 0,207 g MP/km.

Para el nivel de actividad, se consideran los kilómetros recorridos anuales por tipo de vehículo presentados en la Tabla 5.2-5, elaborada a partir de la tabla 4-8 del Manual para el desarrollo de inventarios de emisiones atmosféricas (MMA, 2017), de la cual se tiene que un bus recorre al año 69.848 kilómetros.

En cuanto a la capacidad del filtro DPF de disminuir las emisiones de material particulado, a partir de información obtenida de la tabla 2 del anexo 3 de la Guía para la instalación de sistemas de post tratamiento de emisiones en buses de Transantiago (Subsecretaría de Transportes, 2006), la certificación del sistema de postratamiento de emisiones para un vehículo debe estar verificada por el 3CV (Centro de Control y Certificación Vehicular). A partir de la lista de sistemas certificados por el 3CV, se considera para el cálculo la utilización de un filtro DPF Muffler estilo 6, con medio filtrante sustrato de cerámica y con método de regeneración pasivo mediante recubrimiento catalítico. Para dicho sistema se considera una capacidad de remover material particulado de un 92%⁵. En base a la eficiencia presentada, se asume que al instalar el filtro DPF un bus emitirá un 92% menos de material particulado.

A partir de los factores de emisión y nivel de actividad presentados, se muestra a continuación el cálculo para el caso base, que considera la emisión de un bus estándar urbano EURO III:

$$\text{Emisión}_{\text{Caso Base}} = \text{FE}_{\text{Base}} \times \text{NA}_{\text{Base}}$$

$$\text{Emisión}_{\text{Caso Base}} = 0,207 \text{ (g MP/km)} \times 69.848 \text{ (km/año – bus)} \times 10^{-6} \text{ (t/g)}$$

$$\text{Emisión}_{\text{Caso Base}} = 0,014 \text{ (t MP/año – bus)}$$

Luego, se presenta el cálculo para el caso con mecanismo, que considera la instalación del filtro DPF en el bus y su eficiencia:

$$\text{Emisión}_{\text{Con Mecanismo}} = \text{FE}_{\text{Con Mecanismo}} \times \text{NA}_{\text{Con Mecanismo}}$$

$$\text{Emisión}_{\text{Con Mecanismo}} = 0,207 \text{ (g MP/km)} \times 69.848 \text{ (km/año – bus)} \times 10^{-6} \text{ (t/g)} \times (1 - 0,92)$$

⁵ Link de descarga de tabla con el listado de sistemas de postratamiento de emisiones certificados: <https://www.mtt.gob.cl/archivos/5601>

Emisión Con Mecanismo = 0,001 (t MP/año – bus)

A partir de las emisiones calculadas, se presenta el cálculo de la reducción unitaria de emisiones y a partir de dicho valor el cálculo de la cantidad de filtros DPF a instalar para cumplir con las toneladas totales de contaminante a compensar:

Reducción unitaria = Emisión caso base – Emisión con mecanismo

Reducción unitaria = 0,014 (t MP/año – bus) - 0,001 (t MP/año – bus)

Reducción unitaria = 0,013 (t MP/año – bus)

Filtros DPF a instalar = Toneladas a compensar / Reducción unitaria

Filtros DPF a instalar = 2,0 (t MP/año) / 0,013 (t MP/año – bus)

Filtros DPF a instalar = 153,8 (filtros) ~ 154(filtros)

A partir de los cálculos realizados, el proyecto deberá realizar la instalación de 154 filtros DPF en buses estándar urbanos con norma de emisión EPA98 o EURO III, que pertenezcan al parque vehicular de la ciudad de Calama y su área circundante, para así dar cumplimiento a las toneladas totales a compensar de acuerdo a su RCA.

Ejemplo 2

Un proyecto debe compensar un total de 3 t/año de MP10 por resuspensión. Para compensar sus emisiones el titular ha decidido implementar filtros DPF en una flota de buses estándar urbanos de la ciudad de Calama y su área circundante.

Reducción unitaria = 0,013 (t MP/año – bus), mismo cálculo anterior.

La emisión equivalente en MP10 Combustión es $E = 3/3 = 1$ t/año.

Filtros DPF a instalar = 1,0 (t MP/año) / 0,013 (t MP/año – bus)

Filtros DPF a instalar = 76,9 (filtros) ~ 77(filtros)

5.5. Techos y/o Muros Verdes

Antecedentes, referencias y justificación para su aplicación en Calama.

Esta medida de compensación de emisiones, está incluida en la Guía Compensación 2019 RM. La ciudad de Calama está inmersa en una zona desértica y sus habitantes pueden valorar la generación de áreas verdes, en este caso en los techos, lo cual tiene la ventaja respecto de un área pública en cuanto al cuidado que le puede otorgar el beneficiario. El tipo de vegetación a considerar corresponde estudiarlo al respectivo

proponente.

Descripción del mecanismo

Este mecanismo de compensación consiste en la instalación de techos y/o muros hechos a partir de diferentes tipos de especies vegetales sobre superficies de infraestructuras ubicadas dentro de la ciudad de Calama y su área circundante.

La principal justificación para considerar la implementación de este mecanismo de compensación de emisiones radica en la diversa y amplia variedad de estudios —a nivel internacional y a nivel nacional— que demuestran que esta clase de estructura implica diversos beneficios, entre los cuales se encuentra la mejora en la calidad del aire en la zona donde es instalada.

Considerando la revisión bibliográfica, se constataron capacidades de abatimiento de los techos verdes muy distintas, con resultados que varían principalmente por el tipo de especies vegetales utilizadas.

A continuación, se presentan algunos de los principales beneficios en términos de calidad del aire cuando se instalan techos verdes:

- Utilizando un modelo de depositación seca en la ciudad de Chicago, en Estados Unidos, Yang, YU, & Gong (2008) cuantificaron que 19,8 hectáreas de techos verdes lograron remover un total de 1.675 kg de contaminantes atmosféricos en un año. De este total, la mayor parte corresponde a ozono troposférico (52%), seguido por dióxido de nitrógeno (27%), material particulado respirable (14%) y finalmente dióxido de azufre (7%).
- Cantidades significativas de material particulado se depositan en la vegetación típica utilizada para crear techos verdes; sin embargo, dicha depositación presenta diferencias respecto al tipo de planta a utilizar, siendo las especies con mayor potencial para capturar material particulado *Sedum album*, *Sedum reflexum*, *Sedum palmeri* y *Lampranthus spectabilis*. Dado lo anterior, este tipo de medida tiene el potencial de ser utilizada en planes de descontaminación (Viecco et al., 2018).
- Otro estudio estima que un metro cuadrado de techo verde remueve 2 kg de material particulado al año (Johnson & Newton, 1996).

Los tres ejemplos presentados dan cuenta de las diferentes capacidades de los techos y/o muros verdes de captar contaminantes atmosféricos; sin embargo, reflejan que corresponde a una medida efectiva para mejorar la calidad del aire de las ciudades donde estos se implementen. Para efectos de este banco de proyectos serán considerados como valores referenciales válidos los resultados de una investigación desarrollada por profesionales de la Pontificia Universidad Católica de Chile (FONDEF ID15I10104, Vera et al., 2018), los que son presentados en la figura 1 y la figura 2 de este banco de proyectos.

El DS N°58/2019 que Modifica Decreto Supremo N°47 de Vivienda y Urbanismo de 1992, Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC), para fomentar la construcción de techos verdes (MINVU, 2019), modifica específicamente el artículo 2.6.3 de la referida OGUC en su inciso 20 y agrega los incisos 21, 22 y 23, en donde se establece

que las salas de máquinas, salidas de cajas de escaleras, chimeneas, estanques y similares elementos exteriores ubicados en la parte superior de los edificios no pueden ocupar más del 25% de la superficie de la azotea del último piso. El resto de la superficie de la azotea del último piso de un edificio no utilizada por los elementos y construcciones mencionados se puede destinar a terrazas, piscinas, vegetación, jardineras y elementos ornamentales, en tanto no sobrepasen la mitad de la altura de las barandas o parámetros perimetrales, como también puede albergar paneles solares, los que no podrán sobrepasar los dos metros de altura desde el nivel de la azotea. A partir de lo anterior, se establece que en términos legales es viable implementar techos verdes en la superficie de edificios e instalaciones en la ciudad de Calama y su área circundante.

Algunas potenciales aplicaciones podrían realizarse en techos de edificios privados, edificios públicos, hospitales y clínicas, y establecimientos educacionales (colegios, jardines, universidades), entre otros.

En la Tabla 5.5-1 se presenta el resumen de cumplimiento de criterios para este mecanismo de compensación, el cual se puede utilizar como referencia para la elaboración del informe del PCE si se selecciona este mecanismo para compensar emisiones.

Tabla 5.5-1. Resumen cumplimiento de criterios mecanismo de compensación: techos y/o muros verdes

Criterio	Detalle
Medible	Se puede medir la capacidad de remoción de material particulado de determinadas especies en estudios en laboratorio, lo que es posible realizar hoy en Chile.
Verificable	Es posible verificar la instalación de los techos y/o muros verdes en terreno con fotos a presenta por los beneficiarios o visitas a terreno del interesado.
Adicional	Al no estar obligado el dueño de una superficie disponible a instalar un techo y/o muro verde, la medida se considera como adicional.
Permanente	Con una correcta mantención, se puede hacer perdurar el estado del techo y/o muro verde en forma permanente, o al menos por un tiempo superior al que un proyecto deba compensar sus emisiones.

Fuente: Guía de Alternativas de Compensación de Emisiones para Fuentes de Combustión (DFM, 2019).

Ventajas y desventajas

A continuación, en la Tabla 5.5-2 se listan las principales ventajas y desventajas del mecanismo de compensación presentado:

Tabla 5.5-2. Ventajas y desventajas mecanismo de compensación: techos y muros verdes

Ventajas	Desventajas
<p>a) El mecanismo representa una buena alternativa para mitigar material particulado y gases.</p> <p>b) La implementación de techos y/o muros verdes tiene una serie de ventajas adicionales a la mitigación de contaminantes atmosféricos, como la eficiencia energética, la regulación de la temperatura (mitigación de islas de calor), el control de la cantidad y calidad de la escorrentía y la polinización, entre otras.</p> <p>c) Las especies vegetales comúnmente utilizadas consideran un bajo consumo de agua y son de fácil mantención y seguimiento.</p> <p>d) El mecanismo tiene un beneficio adicional importante relacionado con la captación de gases de efecto invernadero.</p>	<p>a) La eficiencia del mecanismo de compensación se limita a que una vez instalado sea mantenido correctamente, factor que dependerá de la correcta ejecución del mecanismo por parte del titular.</p> <p>b) Actualmente no existe un sistema de fácil verificación de la mantención de este tipo de mecanismos, más que ir a terreno y visitar el lugar, lo que complica el seguimiento.</p> <p>c) La permanencia de la medida depende del interés en el tiempo del beneficiario en cuanto a desarrollar la adecuada mantención del área verde creada.</p> <p>d) Los costos asociados a la implementación de este mecanismo se elevan principalmente por la logística de subir todo el material al techo y utilizar sustratos especiales para permitir el desarrollo de las especies vegetales en bajas profundidades de sustrato. Sin embargo, en la medida que sea más masiva su utilización, los valores promedio van a disminuir por economías de escala en la producción.</p>

Fuente: Guía de Alternativas de Compensación de Emisiones para Fuentes de Combustión (DFM, 2019) y elaboración propia.

Metodología de cálculo de compensación

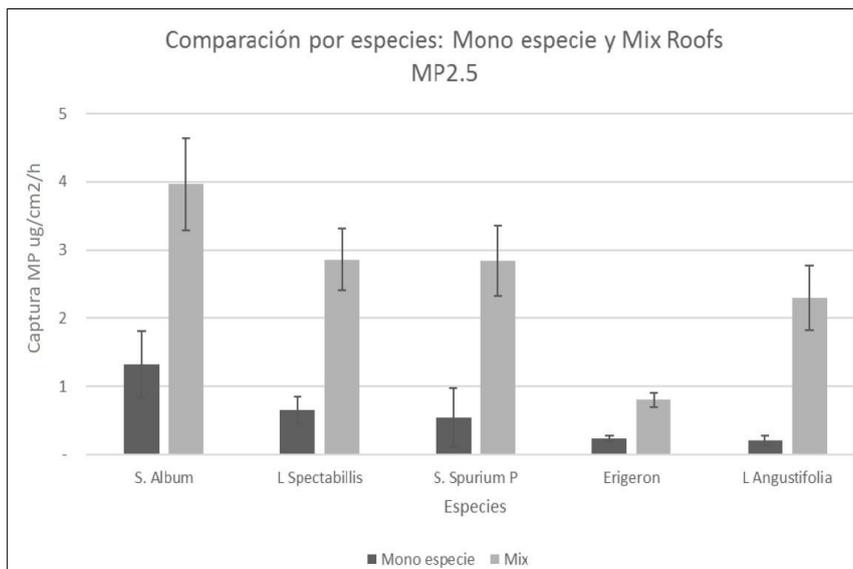
Factores de emisión

Los factores de emisión a considerar para la estimación de reducción de contaminantes atmosféricos deberán ser referenciados a partir de información bibliográfica.

Para efectos de este banco de proyectos, se considerarán como valores por defecto los resultados del proyecto de investigación FONDEF ID15I10104 “Desarrollo de cubiertas vegetales de edificios para la mitigación de la contaminación atmosférica urbana a través de la captura de material particulado en clima semiárido”. de la Pontificia Universidad Católica de Chile, Viecco et al. (2018) y la solicitud de patente N°201803445 (Vera et al., 2018). En la investigación mencionada, se estudiaron seis especies vegetales para

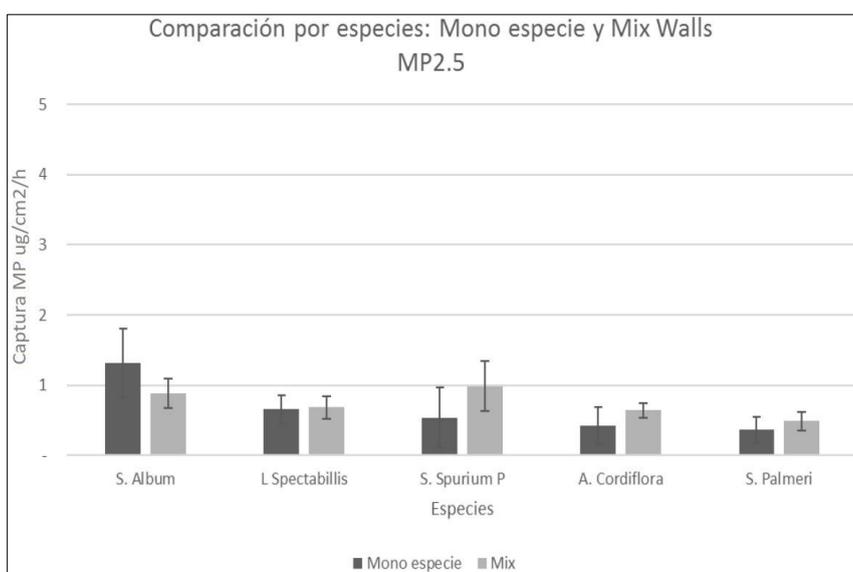
techos verdes (*Sedum álbum*, *L. spectabilis*, *Sedum spurium*, *Erigeron sp.* y *Lavandula angustifolia*) y seis para muros verdes (*Sedum álbum*, *L. spectabilis*, *Sedum spurium*, *Aptenia cordifolia* y *Sedum palmeri*), además de analizarse la capacidad de captura de cada una de ellas considerando la configuración monoespecie (solo una especie) y la configuración en mix de especies vegetales (la especie estudiada y otras dos especies en equivalentes proporciones). A continuación, en la Figura 5-.5-1 y la Figura-2 se presentan la capacidad de captura de material particulado fino (MP10) para techos verdes y para muros verdes, respectivamente:

Figura-1. Comparación de captura de MP2,5 en mono especie y mix para techos verdes



Fuente: resultados investigación elaborada por profesionales de la Pontificia Universidad Católica de Chile (FONDEF ID15I10104, Vera et al., 2018) y Guía de Alternativas de Compensación de Emisiones para Fuentes de Combustión (DFM, 2019)

Figura-2 Comparación de captura de MP2,5 en mono especie y mix para muros verdes



Fuente: resultados investigación elaborada por profesionales de la Pontificia Universidad Católica de Chile (FONDEF ID15I10104, Vera et al., 2018) Guía de Alternativas de Compensación de Emisiones para Fuentes de Combustión (DFM, 2019)

Los valores presentados en los gráficos anteriores, se puede presentar en la siguiente tabla.

Tabla 5.5-3. Comparación por especies: Mono especie y Mix en techos y muros

Especie	Captura MP2,5 [ug/cm2/h]	Captura MP2,5 [ug/cm2/h]	Captura MP2,5 [ug/cm2/h]	Captura MP2,5 [ug/cm2/h]
	Mono especie techo	Mix Techos	Mono especie muro	Mix Muros
S. Album	1,3	4	1,3	0,8
I. Spectabilis	0,5	2,8	0,6	0,7
S. Spurium P	0,4	2,8	0,5	1
Erigeron	0,2	0,7	0,3	0,6
I. Angustifolia	0,2	2,2	0,3	0,5

Por otra parte, el mismo estudio presenta valores para MP10 por especie considerando muros y techos, por mono especie

Tabla 5.5-4. Captura MP10 y MP2,5 por Mono especie

Especies	Captura MP 10 [ug/cm2/h]	Captura MP 2,5 [ug/cm2/h]	Relación MP10/MP2,5
	Mono especie	Mono especie	
S. Album	4,0	1,3	3,0
I. Spectabilis	4,5	0,5	9,0
S. Reflexum	2,4	0,4	6,0
S. Palmeri	2,3	0,3	7,7
A Cordiflora	1,8	0,2	9,0
P. fobirra	1	0,2	5,0
L. Angustofilia	0,9	0,3	3,0
S. Spurium	0,9	0,3	3,0
E. Larvinskianus	0,4	0,1	4,0
Promedio	2,0	0,4	5,5
Desvest	1,3	0,3	2,4

Se obtiene que en promedio, las emisiones de MP10 capturadas son 5,5 veces las emisiones de MP2,5, con una desviación de 2,4. Para realizar un análisis conservador. Para MP10 se aplica un **valor de 3 veces** respecto de MP2,5

Niveles de actividad

El nivel de actividad para este tipo de mecanismo corresponde a la superficie en hectáreas a aplicar la solución, y el factor de emisión utilizado para el cálculo estará indicado por unidad de superficie. El objetivo corresponde a estimar la superficie total que habría que cubrir con techos y/o muros verdes para cumplir con las toneladas totales de contaminante a compensar.

Consideraciones importantes

- ✓ Si se desea implementar un techo y/o muro verde con especies vegetales diferentes a las presentadas como valores referenciales en este banco de proyectos, se deberá

demostrar la capacidad de remoción de contaminantes atmosféricos de las especies a implementar.

- ✓ Esta medida sólo aplica para MP10 o MP2,5 de resuspensión y no para MP10 o MP2,5 de combustión.

Plan de seguimiento

Además de los parámetros requeridos para el plan de seguimiento de un PCE presentados en el capítulo 7 de este banco de proyectos, si se determina realizar la compensación de emisiones mediante la instalación de techos verdes para dar cumplimiento al objetivo general de un plan de seguimiento, se deberá incluir lo que se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 5.5-5. Acreditación plan de seguimiento: techos verdes

Ítem	Forma de acreditación
Acreditación de estado inicial de fuente a compensar	Descripción del área donde se instalará el techo y/o muro verde, con fotografías de su estado inicial.
Acreditación de la ejecución del PCE	A) Descripción de las especies vegetales efectivamente plantadas en el techo y/o muro verde y su comparación con las especies utilizadas como referencia para el cálculo según lo que se declaró en el PCE. B) Certificado de instalación del techo y/o muro verde firmada por el proveedor y el/los beneficiario/s (que incluya capacitación de mantenimiento, motivos del PCE y recepción conforme, entre otros). C) Acreditación de compromiso y forma de verificación de mantenimiento del techo y/o muro verde durante un tiempo igual o superior al período que deba compensar el proyecto en cuestión.
Frecuencia de reportes	Se considera que además de la entrega de un informe final de cumplimiento IFC, con todos los puntos anteriormente señalados, después de realizados los techos y/o muros verdes, se debe realizar reportes anuales, para verificar la mantención de las áreas verdes creadas.

Fuente: Guía de Alternativas de Compensación de Emisiones para Fuentes de Combustión (DFM, 2019) y elaboración propia.

Ejemplo de cálculo aplicado

Para compensar emisiones por medio de la instalación de techos y/o muros verdes, se presentan ejemplos de cálculo para compensar 2 t/año de material particulado de MP10 resuspensión, considerando diferentes especies vegetales tanto en mix como en monoespecie.

En primer lugar, se presenta la opción de instalar techos verdes con un mix que contenga la especie Sedum álbum. Para determinar la capacidad de capturar MP10 se utilizan los resultados presentados en la tabla 5.5-3, a partir de la cual se estima una tasa de captura de 4 ($\mu\text{g}/\text{cm}^2\text{h}$) en MP2,5, y 12 ($\mu\text{g}/\text{cm}^2\text{h}$) en MP10, aplicando un factor 3 de acuerdo a análisis ya presentado. De esta forma, se convierten las unidades para estimar las toneladas de contaminante capturadas por año por cada m^2 de techo verde instalado con

la configuración referida, tal y como se muestra a continuación:

Captura MP10 *S.álbum* en mix = $12 \text{ (}\mu\text{g/cm}^2 \text{ h)} \times 8.760 \text{ (h/año)} \times 100^2 \text{ (cm/m)}^2 \times 10^{-12} \text{ (t/}\mu\text{g)}$

Factor de Emisión Captura MP10 *S.álbum* en mix = $1,1 \times 10^{-3} \text{ (t/m}^2 \text{ año)}$

El valor inverso, determina los m² a desarrollar para reducir 1 t/año de MP10 resuspensión: $1 / 0,0011 = 951 \text{ m}^2/\text{t MP10}$

Así,

Nivel de actividad (metros cuadrados a plantar) = Emisión (t/año) / FE (ton MP10-MP2,5/ha)

Si el proyecto requiere compensar 5 t/año de MP10 resuspensión, las hectáreas necesarias serán:

metros cuadrados a plantar = $2 \text{ ton MP10 resuspendido} / 0,0011 \text{ ton MP10 resuspendido} / \text{m}^2 = 1.903 \text{ m}^2$.

A partir del cálculo anterior, se estima que se requieren 1.903 m² de techos verdes en configuración de mix que contenga la especie Sedum álbum para lograr compensar 2 t/año de MP10 resuspensión.

Se puede aplicar la misma metodología para otra especie. Por ejemplo, si se considera un mix I. Spectabilis, ella tiene una captura de MP2,5 de 2,8 ug/cm² h, en mix, lo cual equivale a 8,4 ug/cm² h en MP10. En este caso, se obtiene que se requieren 2.718 m² a plantar en muro para reducir 2 t/año de MP10 Resuspensión

5.6. Pavimentación de Calles

Descripción del mecanismo y justificación

El mecanismo consiste en pavimentar una calle para reducir las emisiones de material particulado generadas por resuspensión de polvo por el tránsito vehicular. Este mecanismo de compensación se ha aplicado en varios PCE de la Región Metropolitana, siendo una buena opción en calles no pavimentadas de mayor flujo vehicular. En el caso de Calama, se justifica en aquellas calles no pavimentadas de mayor flujo, que no estén consideradas en programas Serviu de pavimentación para que aplique la adicionalidad.

En la Tabla 5.6-1 se presenta el resumen de cumplimiento de criterios para este mecanismo de compensación, el cual se puede utilizar como referencia para la elaboración del informe del PCE si se selecciona este mecanismo para compensar emisiones.

Tabla 5.6-1. Resumen cumplimiento de criterios mecanismo de compensación: pavimentación de calles

Criterio	Detalle
Medible	Es posible determinar las emisiones de calles no pavimentadas y calles pavimentadas a partir de factores de emisión obtenidos de mediciones
Verificable	Para verificar que la reducción de emisiones sea efectiva, se puede comprobar la pavimentación de la calle.
Adicional	Si la calle seleccionada no tiene proyectada su pavimentación por parte del Serviu, se considera que la pavimentación es adicional, ya que de otra forma mantendría su estado no pavimentado.
Permanente	Se entiende que la duración de una calle pavimentada es del orden de varios años, por lo que corresponderá a un período mayor al que un proyecto deba compensar sus emisiones.

Fuente: Elaboración propia.

Ventajas y desventajas

A continuación, en la siguiente tabla, se listan las principales ventajas y desventajas del mecanismo de compensación presentado:

Tabla 5.6-2. Ventajas y desventajas mecanismo de compensación: pavimentación de calles

Ventajas	Desventajas
<p>a) Además de reducir emisiones atmosféricas de material particulado, se genera menos desgaste en los vehículos que circulan por la ruta y estos pueden circular a una velocidad mayor.</p> <p>b) Mejora la calidad de vida de las personas que habitan y trabajan en el entorno directo de la calle.</p>	<p>a) la reducción de emisiones solamente es aplicable para MP10 resuspensión, no reduce emisiones de MP10 combustión.</p> <p>b) se requiere realizar medición de flujo de la calle para conocer la reducción potencial. A mayor flujo de vehicular de la calle, mayor será la reducción lograda por metro lineal a pavimentar.</p> <p>c) requiere tramitar previamente proyecto de ingeniería ante Serviú, su tiempo de implementación puede ser más prolongado que otras alternativas</p>

Fuente: Elaboración propia

Metodología de cálculo de compensación

Factores de emisión

Para determinar los factores de emisión se podrán utilizar valores referenciales. Se sugiere la revisión de los siguientes documentos:

- ✓ Caminos pavimentados: AP42 – capítulo 13.2.1 “Paved roads”.
- ✓ Caminos no pavimentados: AP42 – capítulo 13.2.2 “Unpaved roads”.
- ✓ Guía para la estimación de emisiones atmosféricas de proyectos inmobiliarios para la Región Metropolitana (Seremi MA, 2012).
- ✓ Informe final servicio de recopilación y sistematización de factores de emisión al aire para el Servicio de Evaluación Ambiental (BS Consultores, 2015).

A continuación, en la Tabla 5.6-3 y Tabla 5.6-4 se presentan los parámetros por defecto para el cálculo de los factores de emisión para estimar las emisiones de caminos no pavimentados y pavimentados, para efectos de la aplicación en este banco de proyectos:

Tabla 5.6-3. Parámetros por defecto factores de emisión para resuspensión de MP10 por tránsito de vehículos en caminos no pavimentados

Formula f_e (g/km)	Parámetros
<p>Tipo de calle: no pavimentada con circulación dominada por vehículos pesados</p> <p>($W > 2,7$ ton)</p> $f_e = k \times 281,9 \times \left(\frac{s}{12}\right)^{0,9} \times \left(\frac{W}{2,72}\right)^{0,45}$	<p>k para MP₁₀: 1,5 k para MP_{2,5}: 0,15</p> <p>s: Contenido de material fino en la superficie [%] Valor determinado en este estudio = 3,2</p> <p>W: peso promedio de la flota que transita por las vías [t]</p>
<p>Tipo de Calle: no pavimentada con circulación dominada por vehículos livianos ($W \leq 2,7$ ton)</p>	<p>k para MP₁₀: 1,8 k para MP_{2,5}: 0,18 C para MP₁₀: 0,132493</p>

$f_e = \frac{k \times 281,9 \left(\frac{s}{12}\right) \left(\frac{S}{48,28}\right)^{0,5}}{\left(\frac{M}{0,5}\right)^{0,2}} - C$	C para MP _{2,5} : 0,101484
	S: velocidad media vehicular [km/h]
	M: Humedad del material superficial [%]. Valor determinado en este estudio = 0,2
	s: Contenido de material fino en la superficie [%]. Valor determinado en este estudio = 3,2.

La siguiente tabla, presenta la fórmula para determinar el factor de emisión de MP₁₀ y MP_{2,5} de resuspensión por la circulación de vehículos por calle pavimentada, que depende de la carga superficial de finos, que depende del rango de flujo vehicular.

Tabla 5.6-4. Fórmula para determinar el factor de emisión en calle pavimentada

Formula fe (g/km)	Parámetros
$f_e = k \times (sL)^{0,91} \times (W \times 1,1023)^{1,02}$	k para MP ₁₀ : 0,62 g/km
	k para MP _{2,5} : 0,15 g/km
	sL: carga superficial de finos [g/m ²]. Valores por defecto: 6,0 – para vías con flujo inferior a 500 veh/d 3,6 – para vías con flujo entre 500 y 10.000 veh/d 2,4 – para vías con flujo superior a 10.000 veh/d
	W: peso promedio en toneladas de los vehículos que transitan por las vías

En la tabla anterior se presentan los parámetros que se pueden considerar por defecto. Si el titular prefiere, se pueden realizar mediciones directamente en la calle que se pretende pavimentar para estimar los parámetros s y sL. Al realizar esta medición se deberá considerar una metodología validada por la autoridad, como lo es el Apéndice C.1: “Procedures for sampling surface/bulk dust Loading” del AP-42 de la EPA (AP42, US-EPA, 1993).

Por su parte, el parámetro W para las ecuaciones representa el peso promedio de la flota vehicular que circula por la calle, el cual se determina mediante la siguiente fórmula:

$$W = \frac{\sum_i^n \left(\frac{T_i + P_i}{2} \cdot F_i\right)}{\sum_j^n F_j}$$

Donde:

W: Peso promedio de los vehículos. Ti: Tara del vehículo de categoría (i).

Pi: Peso bruto del vehículo de categoría (i).

Fi: Flujo vehicular de la categoría (i).

Fj: Flujo vehicular de la categoría (j).

Tomando en cuenta el peso promedio calculado, se deberán considerar los siguientes criterios para la estimación del factor de emisión para vehículos que circulan en caminos no pavimentados:

- Si $W \geq 2,7 \rightarrow$ Utilizar fórmula y parámetros para Tránsito vehículos camino no pavimentado, dominado por vehículos pesados de la tabla 5.6-3.
- Si $W < 2,7 \rightarrow$ Utilizar fórmula y parámetros para Tránsito vehículos camino no pavimentado, dominado por vehículos livianos de la tabla 5.6-3.

Niveles de actividad

Para los niveles de actividad se deberán realizar mediciones continuas del flujo vehicular en la calle que se va a pavimentar, con el fin de determinar el Tránsito Medio Diario Anual (TMDA). Las mediciones se deberán hacer al menos durante tres días (un día laboral normal, un sábado y un domingo) conforme a lo que se detalla a continuación:

- ✓ Día laboral normal: se debe elegir un día entre un martes, miércoles o jueves y se debe medir flujos vehiculares por 17 horas continuas, entre las 7:00 y las 23:00 horas.
- ✓ Día sábado: se debe medir flujo vehicular durante 14 horas continuas, entre las 09:00 y las 23:00 horas.
- ✓ Día domingo: se debe medir flujo vehicular durante 12 horas continuas, entre las 10:00 y las 22:00 horas.

Para todos los casos, las mediciones se deben realizar en intervalos de 15 minutos y desagregando los conteos en las siguientes categorías de vehículos:

- ✓ Vehículo liviano (automóviles, camionetas, station wagon, todo terreno, van y similares).
- ✓ Taxi colectivo.
- ✓ Taxi.
- ✓ Bus y microbús.
- ✓ Taxibus (aprox. 40 pasajeros).
- ✓ Bus interurbano.
- ✓ Bus institucional.
- ✓ Furgón escolar.
- ✓ Camión de dos ejes.
- ✓ Camión de más de dos ejes.
- ✓ Motocicleta.

A partir de las mediciones realizadas, se deberá estimar el flujo vehicular anual total que circula por la vía, considerando para ello un total de 247 días laborables, 50 sábados y 68 domingos y festivos en total, tal y como se muestra a continuación:

$$\text{Flujo vehicular anual } \left(\frac{\text{veh}}{\text{año}} \right) = \left(\sum_{i=1}^N \text{FVL}_i \right) \cdot 247 + \left(\sum_{i=1}^N \text{FVS}_i \right) \cdot 50 + \left(\sum_{i=1}^N \text{FVD}_i \right) \cdot 68$$

Donde:

i = Categoría de vehículo i .

FVL = Flujo vehicular medido en día laboral.

FVS = Flujo vehicular medido en día sábado.

FVD = Flujo vehicular medido en día domingo.

Si por algún motivo (costos, tiempo, u otro) el titular decide medir flujo vehicular un solo día, se deberá realizar la medición en un día laboral y conservadoramente se podrá estimar el flujo vehicular anual considerando 247 días al año con el flujo medido, 50 sábados con la mitad de dicho flujo y 68 domingos y festivos sin flujo vehicular.

Por otro lado, se debe considerar multiplicar el flujo vehicular anual por 1,05 para el caso de la calle pavimentada, ya que se asume el incentivo al uso de la calle producto de su pavimentación, por lo se supone un aumento en el flujo de un 5%.

A partir del flujo vehicular total anual, se debe establecer una base de cálculo estandarizada en kilómetros recorridos al año y luego dividir por 1.000 para obtener las toneladas anuales de emisión por metro de calle.

Consideraciones importantes

- ✓ La empresa que realice las mediciones de flujos continuos deberá adjuntar los registros de las mediciones realizadas, indicando nombre y rut de quienes realizaron las mediciones, y nombre y rut del profesional responsable del análisis de los datos, adjuntando la planilla de cálculo respectiva.
- ✓ Dependiendo de la calle donde se realice la pavimentación, para implementarla se seguirá la lógica de pavimentar tramos completos, es decir, la autoridad podrá exigir que se pavimente un tramo en su totalidad aun cuando teóricamente se deban pavimentar menos metros. A modo de ejemplo, si un proyecto logra realizar la compensación de sus emisiones pavimentando 290 metros de una calle específica y en realidad dicha calle tiene un largo de 300 metros, la autoridad podrá exigir pavimentar la calle por completo. Por otro lado, si la calle midiera 500 metros en total, la autoridad podrá exigir que se pavimente hasta al menos una esquina en específico, pudiendo ser los 290 metros o más dependiendo del largo requerido para al menos llegar a una esquina.
- ✓ Esta medida solamente es aplicable a MP10 o MP2,5 de resuspensión.

Plan de seguimiento

Además de los parámetros requeridos para el plan de seguimiento de un PCE presentados en el Capítulo 7 de este banco de proyectos, si se determina realizar la compensación de emisiones mediante la pavimentación de calles, para dar cumplimiento al objetivo general de un plan de seguimiento, se deberá incluir lo que se presenta en la Tabla 5.6-5

Tabla 5.6-5. Acreditación plan de seguimiento: pavimentación de calles

Ítem	Forma de acreditación
Acreditación de estado inicial de fuente a compensar	Verificación del estado inicial de la calle a pavimentar. Esto deberá ser constatado mediante archivo fotográfico. La autoridad puede decidir constatar en terreno
Acreditación de la ejecución del PCE	<p>A) Para dar cuenta del inicio de las obras de pavimentación se deberá presentar la siguiente documentación:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Certificado otorgado por la municipalidad y el Serviu donde se constate que no existe proyecto de pavimentación para la calle seleccionada. ✓ Contrato con empresa encargada de la pavimentación. ✓ Copia del proyecto de urbanización aprobado. ✓ Registro fotográfico de inicio de actividades de pavimentación para ver el estado inicial de la calle. ✓ Si de acuerdo a la resolución exenta de aprobación del PCE se debe realizar una visita a terreno en conjunto con la autoridad, se deberá presentar un acta de respaldo de asistencia a dicha visita al inicio de las obras con un profesional de la Seremi del Medio Ambiente. <p>B) Para dar cuenta del término de las obras de pavimentación, se deberá presentar la siguiente información:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Copia de recepción de obras por parte del Serviu y la municipalidad. ✓ Registro fotográfico de las calles pavimentadas. ✓ Si de acuerdo a la resolución exenta de aprobación del PCE se debe realizar una visita a terreno en conjunto con la autoridad, se presentará un acta de respaldo de asistencia a dicha visita al final de las obras con un profesional de la Seremi del Medio Ambiente.
Frecuencia de reportes	Se considera que es suficiente la entrega de un informe final de cumplimiento IFC, con todos los puntos anteriormente señalados, después de realizada la pavimentación.

Fuente: Guía de Alternativas de Compensación de Emisiones para Fuentes de Combustión (DFM, 2019).

Ejemplo de cálculo aplicado

Luego de obtener su RCA favorable, un proyecto debe compensar 5 t/año de MP10 de resuspensión. Para compensar sus emisiones, el titular del proyecto ha decidido utilizar el mecanismo de pavimentación de calles.

En primer lugar, se determina la reducción de emisiones mediante pavimentación de 100 metros de una calle. Este ejercicio se realiza a partir de un flujo estimado, que se presenta en la siguiente Tabla 5.6-6:

Tabla 5.6-6. Resumen medición de flujo ejemplo aplicado

Parámetros	Vehículos Livianos	Buses	Camiones dos ejes	Camiones de más de dos ejes	Total
Flujo anual estimado (veh/año)	119.340	0	5.576	10.064	134.980
Porcentaje del flujo vehicular Total (%)	88,4%	0,0%	4,1%	7,5%	100,0%
Peso promedio de vehículo (ton)	1,2	12	20	25	
	3,75				

Fuente: Elaboración propia, en base a medición referencial de calle Paipote.

A partir de la medición de flujo vehicular, en la calle circula un total aproximado de 134.980 vehículos al año con un peso promedio de la flota de 3,75 toneladas.

Aplicando fórmula de calle no pavimentada con circulación dominada por vehículos pesados ($W > 2,7$ ton)

$$f_e = k \times 281,9 \times \left(\frac{s}{12}\right)^{0,9} \times \left(\frac{W}{2,72}\right)^{0,45}$$

Los resultados son los siguientes:

PARÁMETROS	UNIDAD	VALOR
s: carga de finos de la superficie (%)	%	3,2
Peso promedio total W	t	3,75
Factor de Corrección días de lluvia	-	0,99
fe: factor de emisión MP10 calle no pavimentada (g/km)	g/km	147,16

Aplicando la fórmula para calle pavimentada:

$$f_e = k \times (sL)^{0,91} \times (W \times 1,1023)^{1,02}$$

PARÁMETROS	UNIDAD	VALOR
K	-	0,62
Carga finos de la superficie (sL) para flujo menor a 500 (veh/día)	gr/m ²	6
Peso promedio total W	t	3,75
Factor de Corrección días de lluvia	-	0,99
fe: factor de emisión MP10 calle pavimentada (g/km)	g/km	12,06

Se observa que la emisión unitaria baja de 147,16 a 12,06 g/km.

Considerando el flujo anual, se puede determinar las emisiones anuales para una pavimentación de 100 metros

PARÁMETROS	UNIDAD	VALOR
D. Distancia pavimentada	m	100
F: Flujo total anual del proyecto para tránsito de vehículos pesados (1)	km/año	134.980
F: Flujo total anual del proyecto para tránsito de vehículos pesados (2)	km/año	141.729
fe _{sp} : Factor de emisión camino sin pavimentar	g/km	147,16
fe _p : Factor de emisión camino pavimentado	g/km	12,06
Esp: Emisión Camino Sin pavimentar (situación actual)	t/año	1,986
Ep: Emisión Camino Pavimentado (proyecto)	t/año	0,171
RE: Reducción de Emisiones	t/año	1,82
Factor de reducción	m/t	55,08

(1) Flujo considerado según mediciones

(2) Se aumenta en 5% considerando que al pavimentar la calle, habrá un redireccionamiento de preferencias por usar la calle.

Según lo anterior, mediante la pavimentación de 100 metros se logra una reducción de 1,82 t/año de MP10 resuspensión. Por otra parte, se obtiene el factor de reducción en metros por tonelada sería de 55,08 m/t.

Dado que el proyecto requiere compensar 5 t/año de MP10 resuspensión, entonces el total mínimo a pavimentar sería:

$$D (m) = 55,08 \text{ m/t} \times 5 \text{ t/año} = 275 \text{ metros.}$$

Por otra parte, debe considerarse la calle completa. Si esta calle tiene 300 metros sin pavimentar, deberá pavimentar los 300 metros.

5.7. Lavado y aspirado de Calles

Descripción del mecanismo y justificación

El mecanismo consiste en aspirar y lavar una calle para reducir las emisiones de material particulado generadas por resuspensión de polvo por el tránsito vehicular. Este programa se justifica desarrollar en Calama considerando que en la ciudad existe una alta cantidad de polvo en las calles. La precaución es que debe haber adicionalidad en cuanto a si un programa de este tipo ya se considera en la acción municipal, por lo tanto, debe hacerse en sectores donde no se contemple. En la Región Metropolitana, se desarrolló el estudio “diagnóstico de efectividad del programa de aspirado de calles, Período 2003 – 2007” realizado por la Usach el año 2004, para el Gobierno Regional de la Región Metropolitana, e cual consideró 12 camiones de aspirado de calles, que recorrieron 50 kilómetros diarios cada uno en 29 comunas de la Región Metropolitana.

Este programa determinó que la eficiencia lograda fue de 41% en MP10 y de 24% en MP2,5. Considerando que en Calama la condición de polvo externa a las calles es mayor, y también hay una condición de viento mayor, y para ser más conservador con la evaluación de esta medida, se castiga esta eficiencia en un factor de 0,7. Por lo tanto se aplica una eficiencia de 28,7% en MP10 y de 15,6% en MP2,5. La evaluación se hace

para un camión lavador de 40 km en lavado/aspirado de calles, en lugares donde no se contemple esta acción por la municipalidad, para que exista adicionalidad, debiendo pasar por la misma calle, al menos 2 veces a la semana.

En la siguiente Tabla 5.7.1, se presenta el resumen de cumplimiento de criterios para este mecanismo de compensación, el cual se puede utilizar como referencia para la elaboración del informe del PCE si se selecciona este mecanismo para compensar emisiones.

Tabla 5.7-1. Resumen cumplimiento de criterios mecanismo de compensación: pavimentación de calles

Criterio	Detalle
Medible	Es posible determinar las emisiones de calles pavimentadas con y sin lavado/aspirado de calles a partir de factores de emisión obtenidos de mediciones
Verificable	Para verificar que la reducción de emisiones sea efectiva, se puede comprobar la realización del lavado de calles con su frecuencia comprometida.
Adicional	Si la calle seleccionada no tiene proyectado un lavado por un servicio público, se considera que la pavimentación es adicional, ya que de otra forma mantendría su estado no pavimentado.
Permanente	Se entiende que la duración de la medida debe ser al menos la misma que el período de las emisiones del proyecto.

Fuente: Elaboración propia.

Ventajas y desventajas

A continuación, en la siguiente tabla, se listan las principales ventajas y desventajas del mecanismo de compensación presentado:

Tabla 5.7-2. Ventajas y desventajas mecanismo de compensación: pavimentación de calles

Ventajas	Desventajas
a) Se logra reducción de emisiones atmosféricas de material particulado. b) Mejora la calidad de vida de las personas que habitan y trabajan en el entorno directo de la calle.	a) la reducción de emisiones solamente es aplicable para MP10 resuspensión, no reduce emisiones de MP10 combustión. b) se requiere realizar medición de flujo de las calles para conocer la reducción potencial. c) la medida es de gestión permanente lo cual obliga a mantener la atención en su ejecución y resultados en todo el período comprometido

Fuente: Elaboración propia

Metodología de cálculo de compensación

Factores de emisión

Para determinar los factores de emisión se podrán utilizar valores referenciales. Se sugiere la revisión de los siguientes documentos:

- ✓ Caminos pavimentados: AP42 – capítulo 13.2.1 “Paved roads”.

- ✓ Caminos no pavimentados: AP42 – capítulo 13.2.2 “Unpaved roads”.
- ✓ Guía para la estimación de emisiones atmosféricas de proyectos inmobiliarios para la Región Metropolitana (Seremi MA, 2012).
- ✓ Informe final servicio de recopilación y sistematización de factores de emisión al aire para el Servicio de Evaluación Ambiental (BS Consultores, 2015).

A continuación, en la siguiente Tabla 5.7-3 se presentan los parámetros por defecto para el cálculo de los factores de emisión para estimar las emisiones de caminos no pavimentados y pavimentados, para efectos de su aplicación en este banco de proyectos:

La siguiente tabla, presenta la fórmula para determinar el factor de emisión de MP₁₀ y MP_{2,5} de resuspensión por la circulación de vehículos por calle pavimentada, que depende de la carga superficial de finos, que depende del rango de flujo vehicular.

Tabla 5.7-3. Fórmula para determinar el factor de emisión en calle pavimentada

Formula fe (g/km)	Parámetros
$f_e = k \times (sL)^{0,91} \times W^{1,02}$	k para MP ₁₀ : 0,62 g/km
	k para MP _{2,5} : 0,15 g/km
	sL: carga superficial de finos [g/m ²]. Valores por defecto: 6,0 – para vías con flujo inferior a 500 veh/d 3,6 – para vías con flujo entre 500 y 10.000 veh/d 2,4 – para vías con flujo superior a 10.000 veh/d
	W: peso promedio en toneladas de los vehículos que transitan por las vías

En la tabla anterior se presentan los parámetros que se pueden considerar por defecto. Si el titular prefiere, se pueden realizar mediciones directamente en la calle que se pretende pavimentar para estimar los parámetros s y sL. Al realizar esta medición se deberá considerar una metodología validada por la autoridad, como lo es el Apéndice C.1: “Procedures for sampling surface/bulk dust Loading” del AP-42 de la EPA (AP42, US-EPA, 1993).

Por su parte, el parámetro W para las ecuaciones representa el peso promedio de la flota vehicular que circula por la calle, el cual se determina mediante la siguiente fórmula:

$$W = \frac{\sum_i^n \left(\frac{T_i + P_i}{2} \cdot F_i \right)}{\sum_j^n F_j}$$

Donde:

W: Peso promedio de los vehículos. Ti: Tara del vehículo de categoría (i).

Pi: Peso bruto del vehículo de categoría (i).

Fi: Flujo vehicular de la categoría (i).

Fj: Flujo vehicular de la categoría (j).

Tomando en cuenta el peso promedio calculado, se deberán considerar los siguientes criterios para la estimación del factor de emisión para vehículos que circulan en caminos

no pavimentados:

- Si $W \geq 2,7 \rightarrow$ Utilizar fórmula y parámetros para Tránsito vehículos camino no pavimentado, dominado por vehículos pesados de la tabla 5.6-3.
- Si $W < 2,7 \rightarrow$ Utilizar fórmula y parámetros para Tránsito vehículos camino no pavimentado, dominado por vehículos livianos de la tabla 5.6-3.

Niveles de actividad

Para los niveles de actividad se deberán realizar mediciones continuas del flujo vehicular en la calle que se va a pavimentar, con el fin de determinar el Tránsito Medio Diario Anual (TMDA). Las mediciones se deberán hacer al menos durante tres días (un día laboral normal, un sábado y un domingo) conforme a lo que se detalla a continuación:

- ✓ Día laboral normal: se debe elegir un día entre un martes, miércoles o jueves y se debe medir flujos vehiculares por 17 horas continuas, entre las 7:00 y las 23:00 horas.
- ✓ Día sábado: se debe medir flujo vehicular durante 14 horas continuas, entre las 09:00 y las 23:00 horas.
- ✓ Día domingo: se debe medir flujo vehicular durante 12 horas continuas, entre las 10:00 y las 22:00 horas.

Para todos los casos, las mediciones se deben realizar en intervalos de 15 minutos y desagregando los conteos en las siguientes categorías de vehículos:

- ✓ Vehículo liviano (automóviles, camionetas, station wagon, todo terreno, van y similares).
- ✓ Taxi colectivo.
- ✓ Taxi.
- ✓ Bus y microbús.
- ✓ Taxibus (aprox. 40 pasajeros).
- ✓ Bus interurbano.
- ✓ Bus institucional.
- ✓ Furgón escolar.
- ✓ Camión de dos ejes.
- ✓ Camión de más de dos ejes.
- ✓ Motocicleta.

A partir de las mediciones realizadas, se deberá estimar el flujo vehicular anual total que circula por la vía, considerando para ello un total de 247 días laborables, 50 sábados y 68 domingos y festivos en total, tal y como se muestra a continuación:

$$\text{Flujo vehicular anual } \left(\frac{\text{veh}}{\text{año}} \right) = \left(\sum_{i=1}^N \text{FVL}_i \right) \cdot 247 + \left(\sum_{i=1}^N \text{FVS}_i \right) \cdot 50 + \left(\sum_{i=1}^N \text{FVD}_i \right) \cdot 68$$

Donde:

i = Categoría de vehículo i .

FVL = Flujo vehicular medido en día laboral.

FVS = Flujo vehicular medido en día sábado.

FVD = Flujo vehicular medido en día domingo.

Si por algún motivo (costos, tiempo, u otro) el titular decide medir flujo vehicular un solo día, se deberá realizar la medición en un día laboral y conservadoramente se podrá estimar el flujo vehicular anual considerando 247 días al año con el flujo medido, 50 sábados con la mitad de dicho flujo y 68 domingos y festivos sin flujo vehicular.

Por otro lado, se debe considerar multiplicar el flujo vehicular anual por 1,05 para el caso de la calle pavimentada, ya que se asume el incentivo al uso de la calle producto de su pavimentación, por lo se supone un aumento en el flujo de un 5%.

A partir del flujo vehicular total anual, se debe establecer una base de cálculo estandarizada en kilómetros recorridos al año y luego dividir por 1.000 para obtener las toneladas anuales de emisión por metro de calle.

Consideraciones importantes

- ✓ La empresa que realice las mediciones de flujos continuos deberá adjuntar los registros de las mediciones realizadas, indicando nombre y rut de quienes realizaron las mediciones, y nombre y rut del profesional responsable del análisis de los datos, adjuntando la planilla de cálculo respectiva.
- ✓ Dependiendo de la calle donde se realice el lavado y aspirado, para implementarla se seguirá la lógica de lavar y aspirar tramos completos, es decir, la autoridad podrá exigir que se pavimente un tramo en su totalidad aun cuando teóricamente se deban lavar y aspirar menos metros. A modo de ejemplo, si un proyecto logra realizar la compensación de sus emisiones lavando y aspirando 290 metros de una calle específica y en realidad dicha calle tiene un largo de 300 metros, la autoridad podrá exigir lavar y aspirar la calle por completo. Por otro lado, si la calle midiera 500 metros en total, la autoridad podrá exigir que se lave y aspire hasta al menos una esquina en específico, pudiendo ser los 290 metros o más dependiendo del largo requerido para al menos llegar a una esquina.
- ✓ Esta medida sólo aplica para MP10 o MP2,5 de resuspensión y no para MP10 o MP2,5 de combustión.

Plan de seguimiento

Además de los parámetros requeridos para el plan de seguimiento de un PCE presentados en el Capítulo 7 de este banco de proyectos, si se determina realizar la compensación de emisiones mediante la pavimentación de calles, para dar cumplimiento al objetivo general de un plan de seguimiento, se deberá incluir lo que se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 5.7-4. Acreditación plan de seguimiento: aspirado y lavado de calles

Ítem	Forma de acreditación
Acreditación de estado inicial de fuente a compensar	Verificación del estado inicial de la calle a desarrollar lavado y aspirado de calle. Esto deberá ser constatado mediante archivo fotográfico. La autoridad puede decidir constatar en terreno
Acreditación de la ejecución del PCE	<p>A) Para dar cuenta del inicio del lavado/aspirado de calles deberá presentar la siguiente documentación:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Certificado otorgado por la municipalidad donde se constate que no existe proyecto municipal por el lavado/aspirado de la calle. ✓ Contrato con empresa encargada del lavado aspirado de calle que indique la frecuencia de lavado de al menos 2 veces por semana para la respectiva calle ✓ Registro fotográfico de inicio de actividades de lavado/aspirado de calle para ver el estado inicial de la calle. ✓ Si de acuerdo a la resolución exenta de aprobación del PCE se debe realizar una visita a terreno en conjunto con la autoridad, se deberá presentar un acta de respaldo de asistencia a dicha visita al inicio de las obras con un profesional de la Seremi del Medio Ambiente. <p>B) Registros mensuales que indiquen:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Recorrido. ✓ Registro fotográfico. ✓ Cantidades de polvo capturado en kilos/mes y registro del lugar autorizado de disposición final.
Frecuencia de reportes	Los informes deben ser mensuales, con un consolidado anual, por los años comprometidos en el respectivo PCE.

Fuente: Elaboración propia

Ejemplo de cálculo aplicado

Luego de obtener su RCA favorable, un proyecto debe compensar 15 t/año de MP10 de resuspensión. Para compensar sus emisiones, el titular del proyecto ha decidido utilizar el mecanismo de pavimentación de calles.

En primer lugar, se determina la reducción de emisiones mediante el lavado/aspirado de 1 km de calles. Este ejercicio se realiza a partir de un flujo estimado, que se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 5.7-5. Resumen medición de flujo ejemplo aplicado

Parámetros	Vehículos Livianos	Buses	Camiones dos ejes	Camiones de más de dos ejes	Total
Flujo anual estimado (veh/año)	721.548	80.308	63.580	64.736	930.172
Porcentaje del flujo vehicular Total (%)	77,6%	8,6%	6,8%	7,0%	100,0%
Peso promedio de vehículo (ton)	1,2	12	20	25	
5,07					

Fuente: Elaboración propia, en base a medición referencial de calle Francisco Martinic.

A partir de la medición de flujo vehicular, en la calle circula un total aproximado de 134.980 vehículos al año con un peso promedio de la flota de 5,07 toneladas.

Aplicando la fórmula para calle pavimentada:

$$f_e = k \times (sL)^{0,91} \times W^{1,02}$$

PARÁMETROS	UNIDAD	VALOR
k para MP10	g/km	0,62
k para MP2,5	g/km	0,15
Carga finos de la superficie (sL) para flujo entre 500 y 10.000 (veh/día)	gr/m2	3,6
Peso promedio total W	t	5,07
Factor de Corrección días de lluvia	-	0,99
fe: factor de emisión MP10 calle pavimentada	g/km	10,32
fe: factor de emisión MP2,5 calle pavimentada	g/km	2,50

Se observa que la emisión unitaria fe para MP10 es de 10,32 g/km y para MP2,5 de 2,5 g/km.

Considerando el flujo anual, se puede determinar las emisiones anuales para un lavado de calles de 1 km.

PARÁMETROS	UNIDAD	VALOR
D. Distancia a aplicar lavado/aspirado de calle	m	1.000
F: Flujo total anual del proyecto para tránsito de vehículos pesados	km/año	930.172
fe: Factor de emisión MP10 camino pavimentado	g/km	10,32
fe: Factor de emisión MP2,5 camino pavimentado	g/km	2,50
EMP10: Emisión MP10 Camino pavimentado (situación actual)	t/año	9,60
EM2,5: Emisión MP2,5 Camino Pavimentado (situación actual)	t/año	2,32
Eficiencia lavado de calles MP10	%	28,7%
Eficiencia lavado de calles MP2,5	%	16,8%
RE: Reducción de Emisiones MP10	t/año	2,75
RE: Reducción de Emisiones MP2,5	t/año	0,39
Factor de reducción MP10	m/t	363
Factor de reducción MP2,5	m/t	2.564

Según lo anterior, un programado de lavado/aspirado de calles de 1 km, permite una reducción de MP10 de 2,75 t/año y de MP 2,5 de 0,39 t/año. Por otra parte, se obtiene el factor de reducción en metros por tonelada sería de 363 m/t de MP10 y 2.564 m/t de MP2,5.

En general se puede ver que es poco efectivo para abatir MP2,5, por lo cual, en general

se aplica para MP10.

Dado que el proyecto requiere compensar 15 t/año de MP10 resuspensión, entonces el total mínimo a pavimentar sería:

$$D \text{ (m)} = 363 \text{ m/t} \times 15 \text{ t/año} = 5.446 \text{ metros.}$$

De acuerdo a lo anterior, para lograr la reducción de 5 t/año de MP10 resuspensión, se debe considerar un programa de lavado y aspirado de calles de 5.446 metros. Las calles a considerar deben considerar toda su extensión, por lo tanto, el total será superior al indicado de manera de abarcar el total de la respectiva calle.

5.8. Plantación y/o Mantenimiento de Áreas Verdes

Antecedentes, referencias y justificación para su aplicación en Calama.

Esta medida de compensación de emisiones, está considerada en el Plan verde de CONAMA 2005 y también en la Guía Compensación 2016 Andacollo. La ciudad de Calama está inmersa en una zona desértica y sus habitantes pueden valorar la generación de áreas verdes, en este caso en el entorno de la ciudad. El éxito de esta medida es que el sector a escoger pueda tener los cuidados respectivos ante acciones de terceros, ya sea en un parque público o privado y también pueda tener al menos una institución responsable de su mantenimiento. El Plan Verde de CONAMA 2005, establece en general un valor de 2,15 hectáreas a crear en áreas verdes para reducir una tonelada, pero el PCE específicos la autoridad de la RM ha aceptado hasta un factor de 1 hectárea por tonelada, en zonas de mayor interés de preservación. El factor de emisión sería en ese caso de $1 / 2,15 = 0,465$ t/ha.

Andacollo establece un valor de 0,5 hectáreas a crear en áreas verdes para reducir una tonelada. El valor a aplicar depende del interés de la autoridad regional en fomentar esta opción. El factor de emisión sería en ese caso de $1 / 0,5 = 2,0$ t/ha.

Dado que, en Calama, esta opción se visualiza como relevante no solamente para la captación de emisiones sino para la calidad de vida de su entorno, se propone considerar valor de 0,5 hectáreas por tonelada MP10, eso sí, solamente para MP10 de resuspensión, en ningún caso para MP10 de combustión, siendo de todos modos más conservador que en Andacollo.

Descripción del mecanismo

Se distinguen dos alternativas de compensación, plantación y mantenimiento, y solamente mantenimiento en caso de proyecto que requieran compensar emisiones por 1 o 2 años. En estricto rigor, el titular de un proyecto que debe compensar está obligado a construir y mantener una determinada superficie de áreas verdes para garantizar que las emisiones adicionales de su proyecto se cancelan con las de la compensación. Sin embargo, podría compensar manteniendo áreas verdes que se encuentren liberadas de la obligación de

compensación, entendiéndose por tales a áreas verdes aquellas que fueron utilizadas para compensar y que ya cumplieron con esta obligación.

Es importante destacar que, para los efectos de este banco de proyectos, se entiende como área verde, aquella “capaz de captar MP10”, o sea, la que posee arbolado. Por lo tanto, se debe privilegiar la generación de superficies compuestas de árboles. No obstante, estas superficies podrán ser complementadas con césped, arbustos, mobiliario urbano, luminaria, etc. En todo caso, se deben cumplir los siguientes criterios:

- ✓ La cobertura arbórea debe alcanzar al menos un 40% de la superficie y debe tener preferentemente especies nativas y en menor grado exóticas.
- ✓ Se debe privilegiar la plantación de especies nativas de la zona, pues tienen la ventaja de estar acondicionadas al clima y geografía de la región, y por lo tanto, sus cuidados serán menores en relación con las especies introducidas.
- ✓ Las especies deben poseer hojas anchas y perennes. Está demostrado que los árboles captan los contaminantes, principalmente, a través de sus hojas, y por ello se hace necesario que los árboles tengan follaje durante todos los meses del año. La relación de especies caducas y perennes deberá ser al menos de 75% del segundo tipo.
- ✓ Los árboles deben poseer resistencia a la contaminación atmosférica, pues existen especies altamente sensibles a las emisiones. Debe favorecerse entonces, la selección de aquellos individuos que puedan sobrevivir en este tipo de ambientes.
- ✓ Deben tener bajo requerimiento hídrico. Existen especies que demandan mayor cantidad de agua, como por ejemplo las introducidas. Por esto se deben elegir mayoritariamente árboles que necesiten poco riego. Algunas especies a considerar serían Chañar, Tamarugo, Algarrobo blanco, Pimiento, Asuarina y Robinia Pseudoacacia.
- ✓ Se debe favorecer la plantación de especies con bajos costos de mantención. Esto está íntimamente ligado a un análisis del suelo en donde se generará el área verde y de aquellas especies aptas para poder sobrevivir en él.
- ✓ Asimismo, se deben evitar especies que puedan provocar alergias a la población, y favorecer aquellas resistentes a las plagas y enfermedades.

Tabla 5.8-1. Resumen cumplimiento de criterios mecanismo de compensación: construcción y/o mantención de áreas verdes

Criterio	Detalle
Medible	El uso de planos y coordenadas topográficas permiten medir la superficie involucrada. La presencia de árboles se puede realizar por medio de un conteo en terreno.
Verificable	La existencia del área verde se puede verificar por medio de registros audiovisuales o visitas a terreno.
Adicional	Si la construcción del área verde no forma parte de un compromiso o una obligación ambiental previa del titular, se entiende como una medida adicional.
Permanente	El área verde mantendrá su capacidad de captación de MP10 mientras se realicen las labores de mantenimiento comprometidas.

Fuente: elaboración propia.

Ventajas y desventajas

A continuación, en la siguiente tabla, se listan las principales ventajas y desventajas del mecanismo de compensación presentado:

Tabla 5.8-2. Ventajas y desventajas mecanismo de compensación: construcción y/o mantenimiento de áreas verdes

Ventajas	Desventajas
<p>a) El mecanismo genera la reducción de una fuente importante de MP10.</p> <p>b) La arborización genera una serie de beneficios adicionales como son la absorción de CO₂ y otros gases contaminantes, moderación de temperaturas extremas, control de ruidos, protección de la biodiversidad, reducción de la erosión, etc.</p>	<p>a) Disponibilidad de terrenos adecuados y de agua para riego dificultan la implementación de este mecanismo.</p> <p>b) Áreas verdes son vulnerables a daños y hurtos, especialmente durante la fase de consolidación de la vegetación, si no se contemplan cierres perimetrales u otras medidas de seguridad que encarecen el proyecto.</p>

Fuente: elaboración propia.

Metodología de cálculo de compensación

La compensación a través de la construcción y mantenimiento, o mantenimiento de áreas verdes se cuantifica en hectáreas construidas y mantenidas, o bien, en hectáreas mantenidas por año.

Factores de emisión

Para determinar la cantidad de hectáreas que debe construir y mantener un proyecto, se establece que la efectividad en el abatimiento de material particulado de una hectárea de área verde consolidada es de 0,5 hectáreas por tonelada MP10. El factor de emisión sería en ese caso de $1 / 0,5 = 2,0$ t/ha.

Niveles de actividad

El nivel de actividad en este caso corresponde a la superficie del área verde a construir y/o mantenida, siendo su unidad la hectárea.

Consideraciones importantes

- ✓ Para un área verde construida, el período durante el cual se reconocerá la compensación de emisiones será, a lo menos, por lo que se extienda la vida útil

del proyecto, en el entendido que se realicen las medidas de mantenimiento comprometidas. Este plazo se puede extender para efectos de utilizarse el área verde para compensar emisiones de otros proyectos según lo que ya se ha señalado.

- ✓ Se entiende que la responsabilidad por la compensación de emisiones recae sobre el titular del proyecto, independiente que éste externalice la implementación de la misma. Al respecto, los conflictos que pudieran presentarse entre éstos no eximen al titular de su responsabilidad debiendo éste resolver estos problemas en otras instancias.
- ✓ Esta medida sólo aplica para MP10 de resuspensión y no para MP10 de combustión.

Plan de seguimiento

Además de los parámetros requeridos para el plan de seguimiento de un PCE presentados en el Capítulo 7 de este banco de proyectos, para dar cumplimiento al objetivo general de un plan de seguimiento, se tendrá que incluir lo que se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 5.8-3. Acreditación plan de seguimiento: construcción y/o mantención de áreas verdes

Ítem	Forma de acreditación
Acreditación de estado inicial de fuente a compensar	A) Registro fotográfico. B) Carta de la municipalidad indicando interés en la creación y/o mantención del área verde propuesto C) Plano de ubicación a escala y en coordenadas UTM y cálculo de superficies involucradas.
Acreditación de la ejecución del PCE	A) Contrato entre titular del proyecto y propietario del terreno, donde quede comprometido el uso del mismo como área verde por el período que corresponda. Se debe adjuntar además los antecedentes que garanticen la construcción y mantención de las áreas verdes, en particular, la disponibilidad de plantas, agua, cercos, mano de obra, combustible, etc. B) Si el terreno ya ha sido utilizado para compensar emisiones de otro proyecto, y ya ha cumplido el plazo comprometido en la respectiva RCA para su mantención, se deben adjuntar los antecedentes que permitan en forma fehaciente establecer que el nuevo titular se hará cargo de la mantención del área verde y los antecedentes que permitan acreditar que se construirá y mantendrá ésta cuando corresponda. C) Registro fotográfico. D) Visita de inspección a terreno de la autoridad junto al titular.
Frecuencia de reportes	Se considera que además de la entrega de un informe final de cumplimiento IFC, con todos los puntos anteriormente señalados, después de la creación de áreas verdes, se debe realizar reportes anuales, para verificar la mantención de las áreas verdes y realizar plantaciones adicionales en caso que el prendimiento sea menor al esperado, o mejorar por ejemplo el riego o la mantención según

sea el caso. Es deseable que la auditoría sea realizada por una empresa distinta a la que está encargada de la mantención.

Fuente: elaboración propia.

Ejemplo de cálculo aplicado

Luego de obtener su RCA favorable, un proyecto debe compensar 5,0 t/año de MP10 resuspensión. Para compensar sus emisiones, el titular del proyecto ha decidido utilizar el mecanismo de creación y mantención de áreas verdes.

La fórmula a aplicar es la siguiente:

$$\text{Emisión (t/año)} = \text{Nivel de actividad (hectáreas áreas verdes)} \times \text{FE (ton MP10/ha)}$$

$$\text{Reducción unitaria por hectárea} = 0,5 \text{ ton MP10 resuspendido /ha.}$$

Así,

$$\text{Nivel de actividad (hectáreas áreas verdes)} = \text{Emisión (t/año)} / \text{FE (ton MP10-MP2,5/ha)}$$

Si el proyecto requiere compensar 5 t/año de MP10 resuspensión, las hectáreas necesarias serán:

$$\text{Hectáreas a forestar} = 5 \text{ ton MP10 resuspendido} / 0,5 \text{ ton MP10 resuspendido /ha} = 2,5 \text{ hectáreas.}$$

5.9. Estabilización de veredas, bermas y bandejones.

Antecedentes, referencias y justificación para su aplicación en Calama.

Esta medida de compensación de emisiones, no ha sido utilizada previamente para la compensación de emisiones, sin embargo en la zona de Calama puede ser relevante considerarla, debido a la alta cantidad de veredas y bandejones sin pavimentar y la alta frecuencia de vientos de cierta magnitud que genera emisiones por el viento desde cierta intensidad.

Para la estimación de las emisiones de la situación base se considera la metodología considerada en la “Guía para la Estimación de Emisiones Atmosféricas para la RM”, MMA 2020, en su sección erosión eólica. Dicha sección, hace referencia a la metodología EPA, Capítulo 11, sección 11.9 “Western Surface Coal Mining, Octubre 1998” del documento AP42.

Descripción del mecanismo

Este mecanismo de compensación consiste en realizar la estabilización de veredas, bermas y bandejones de tierra, que se encuentren con una superficie de polvo expuesto a la erosión eólica. Es decir que su superficie se encuentre sin una cobertura y con una carpeta de tierra expuesta a la erosión del viento.

La compensación de emisiones se realiza por medio de la implementación de una carpeta que cubra totalmente la superficie de tierra, mediante un material libre de polvo tal como hormigón, asfalto, estabilizado químico o pastelones que asegure su duración durante al menos las emisiones generadas por el proyecto.

En la siguiente tabla, se presenta el resumen de cumplimiento de criterios para este mecanismo de compensación, el cual se puede utilizar como referencia para la elaboración del informe del PCE si se selecciona este mecanismo para compensar emisiones.

Tabla 5.9-1. Resumen cumplimiento de criterios mecanismo de compensación: Estabilización de veredas, bermas y bandejes

Criterio	Detalle
Medible	El área a ser cubierta, así como el porcentaje de tiempo con velocidades del viento superiores a 5,4 m/s son de fácil medición y existen antecedentes históricos de larga data.
Verificable	La evidencia a presentar por el proponente tal como fotografías y planos del área cubierta, así como su permanencia en el tiempo, son de fácil verificación.
Adicional	En la medida que no existan programas públicos que consideren esta medida, el mecanismo es adicional.
Permanente	Siempre y cuando se mantenga en buenas condiciones la carpeta, su vida útil se extenderá por un tiempo al menos igual o superior a la cantidad de años que el proyecto deberá compensar sus emisiones.

Fuente: elaboración propia.

Ventajas y desventajas

A continuación, en la siguiente tabla, se listan las principales ventajas y desventajas del mecanismo de compensación presentado:

Tabla 5.9-2. Ventajas y desventajas mecanismo de compensación: Estabilización de veredas, bermas y bandejes

Ventajas	Desventajas
<p>a) Fácil implementación, seguimiento y verificación de eliminación de la carpeta sin cobertura.</p> <p>b) Además de disminuir o eliminar la generación de contaminación a la atmósfera, mejora la calidad del aire intradomiciliario en los hogares más cercanos al área cubierta.</p>	<p>a) Dependiendo del tipo de carpeta a usar, su costo es variable.</p> <p>b) Se requiere un área muy extensa para obtener un volumen de emisiones a compensar relevantes.</p>

Fuente: elaboración propia

Metodología de cálculo de compensación

El factor de emisión a aplicar, corresponde a las emisiones asociadas a áreas expuestas a la acción del viento. Se expresa en unidades de kilogramos por hectáreas de material apilado diario:

$$MP: \quad FE = k * \left(\frac{s}{1,5}\right) * \left(\frac{f}{15}\right) \left[\frac{\text{kg}}{\text{ha-día}}\right]$$

Donde:

FE: Factor de emisión [kg/ha-día]

k: Factor de escala según tamaño de partícula [adimensional], donde:

- MP₁₀: 0,95
- MP_{2,5}: 0,14

s: Contenido de finos del material expuesto [%]

f: Porcentaje [%] del tiempo en que el viento excede los 5,4 [m/s]

Se considera que el contenido de finos del material (s) es de 3,2% de acuerdo a lo determinado en este estudio para calles no pavimentadas, suponiendo que es el mismo polvo.

Se determina que el porcentaje del tiempo con vientos superiores a 5,4 m/s, es de 26 % de acuerdo a mediciones realizadas en la Estación “Hospital El Cobre” ubicada en la ciudad de Calama.

Aplicando la fórmula y los valores ya señalados, se obtienen los siguientes resultados

Tabla 5.9-3. Parámetros de emisiones en bandejonos y veredas

PARÁMETROS	UNIDAD	VALOR	Referencia
k MP10	Adimensional	0,953	Guía 2020 Estimación Emisiones Atmosféricas, sección erosión eólica
k MP2,5	Adimensional	0,146	
s: Contenido de finos de la superficie (%)	%	3,2	Determinado en este estudio
f porcentaje del tiempo con vientos superiores a 5,4 m/s	%	26,0	Datos obtenidos de estación meteorológica Hospital el Cobre de Calama
FE MP10: Factor de emisión	kg/ha-día	3,52	Aplicación de fórmula
FE MP 2,5: Factor de emisión	kg/ha-día	0,54	Aplicación de fórmula
Total de días al año	días/año	365	Días del año
Factor Emisión anual MP10 en 1 hectáreas	(t MP10 / año)/ ha	1,286	FE MP10 (kg/día) x 365/1000
Factor Emisión anual MP2,5 en 1 hectáreas	(t MP2,5 / año)/ ha	0,197	FE MP2,5 (kg/día) x 365/1000
Hectáreas por t MP10	ha / (t MP10 / año)	0,78	Valor inverso E MP10 para 1 ha
Hectáreas por t MP2,5	ha / (t MP2,5 / año)	5,07	Valor inverso E MP2,5 para 1 ha

Niveles de actividad

El nivel de actividad en este caso corresponde a la superficie del área verde a construir y/o mantenida en veredas, bermas y bandejones, siendo su unidad la hectárea.

Consideraciones importantes

Para el mecanismo de estabilización de veredas, bermas y bandejones, se deberá tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- ✓ Al momento de determinar la cantidad de hectáreas a cubrir, si el resultado del cálculo da un número decimal, este se deberá aproximar al entero superior.
- ✓ El titular que decida realizar la compensación de sus emisiones por medio de este mecanismo será el responsable asegurar el mantenimiento de la carpeta durante al menos 10 años.
- ✓ Dependiendo de la vereda, berma o bandejón, donde se realice la estabilización, para implementarla se seguirá la lógica de considerar tramos completos, es decir, la autoridad podrá exigir que se aplique un tramo en su totalidad aun cuando teóricamente se deba aplicar en menos metros.
- ✓ Las emisiones reducidas por la cobertura corresponden a emisiones de MP10 o MP2,5 de resuspensión por lo cual podrían ser utilizados solo para MP10 o MP2,5 de resuspensión, en ningún caso por emisiones de combustión.

Plan de seguimiento

Además de los parámetros requeridos para el plan de seguimiento de un PCE presentados en el Capítulo 7 de este banco de proyectos, si se determina realizar la compensación de emisiones mediante un programa de Estabilización de veredas, bermas y bandejones, para dar cumplimiento al objetivo general de un plan de seguimiento, se tendrá que incluir lo que se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 5.9-4. Acreditación plan de seguimiento: estabilización de veredas, bermas y bandejones

Ítem	Forma de acreditación
Acreditación de estado inicial de área a cubrir	Reporte con imágenes y planos de la zona a utilizar en la compensación de emisiones.
Acreditación de la ejecución del PCE	A) Reporte con imágenes y planos de la zona en que fue desarrollada la cobertura, planilla de cálculo de la estimación de la reducción de emisiones conseguida que dé cuenta de la correcta implementación del PCE.
Frecuencia de reportes	Se considera que es suficiente la entrega de un informe final de cumplimiento IFC y un reporte de verificación al final de los 10 años de duración de la compensación.

Fuente: elaboración propia.

Ejemplo de cálculo aplicado

Luego de obtener su RCA favorable, un proyecto debe compensar 2,0 t/año de MP10 resuspensión. Para compensar sus emisiones, el titular del proyecto ha decidido utilizar el mecanismo de estabilización de veredas, bermas y bandejones.

La fórmula a aplicar es la siguiente:

$$\text{Emisión (t/año)} = \text{Nivel de actividad (hectáreas a aplicar)} / \text{FE (ton MP10/ha)}$$

Para determinar los factores de emisión y niveles de actividad a utilizar para el cálculo, se han considerado los valores de actividad presentados en la tabla 5.9-3, con un valor de 1,286 t MP10/ha-año.

Al realizar la división de la emisión a ser compensada por el valor del factor de emisión resulta: $2 / 1,286 = 1,56$ ha a ser cubierta.

A partir de los cálculos realizados, el proyecto deberá realizar la cobertura de un área de 1,56 hectáreas, dentro de la ciudad de Calama y su área circundante, para así dar cumplimiento a las toneladas totales a compensar de acuerdo a su RCA.

6. Formato de Ingreso de Nuevos Mecanismos de Compensación

Los nueve mecanismos presentados en este banco de alternativas de compensación de emisiones, corresponden a alternativas propuestas para que los titulares puedan realizar la compensación de sus emisiones atmosféricas en base a lo que indica la RCA de su proyecto.

Si en el futuro un titular, una empresa o una persona quisiera proponer un nuevo mecanismo o tecnología para compensar emisiones, lo podrá proponer y será evaluado por la autoridad (Seremi del Medio Ambiente), y de ser aprobado se publicará como un nuevo anexo al presente banco de proyectos de alternativas de compensación de emisiones. La idea es que esta se vaya actualizando en el tiempo, debido a que es posible que alguno de los mecanismos presentados quede obsoleto o bien se creen nuevas tecnologías que permitan compensar emisiones.

De ser requerido por la autoridad, se podrá sostener una reunión entre el proponente y profesionales de la Seremi del Medio Ambiente, en la cual se pueda analizar la factibilidad de incluir el mecanismo como un nuevo anexo del banco de proyectos de alternativas de compensación de emisiones.

En base a lo anterior, se presenta en este anexo el formato de ingreso para nuevos mecanismos de compensación, el que deberá ser llenado y entregado por el proponente ante la Seremi del Medio Ambiente.

Descripción del mecanismo y justificación

Se deberá describir con detalle el mecanismo y su justificación para ser considerado como alternativa de compensación de emisiones.

Es importante demostrar que la alternativa propuesta cumple los criterios requeridos para ser considerado como mecanismo de compensación de emisiones, de acuerdo a lo presentado en la Tabla 6-1

Tabla 6-1. Resumen cumplimiento de criterios mecanismo de compensación

Criterio	Detalle
Medible	
Verificable	
Adicional	
Permanente	

Metodología de cálculo de compensación

En este inciso se deberá explicar con detalle la metodología de cálculo para estimar la compensación de emisiones con la alternativa propuesta, para lo que se deberán incluir fórmulas y referencias bibliográficas, entre otros elementos útiles.

Es importante mencionar que se deberá explicar de forma separada la forma en que se determinarán los factores de emisión y niveles de actividad asociados a la alternativa presentada (ya sea por referencias bibliográficas, mediciones u otros).

Consideraciones importantes

En este inciso se presentará cualquier consideración importante que haya que tener sobre el mecanismo propuesto como, por ejemplo, algún tipo de medición que se deba realizar o algo relacionado con el alcance o sus posibles restricciones, entre otras consideraciones relevantes.

Plan de seguimiento

Se deberá presentar el plan de seguimiento requerido para verificar la correcta ejecución e implementación de la alternativa propuesta. Para esto, además de los requerimientos generales de todo plan de seguimiento presentados en el Capítulo 7 de este banco de proyectos, se debe completar la Tabla 6-2, indicando los parámetros relevantes.

Tabla 6-2. Acreditación plan de seguimiento

Ítem	Forma de acreditación
Acreditación de estado inicial de fuente a compensar	
Acreditación de la eficiencia del mecanismo.	
Acreditación de la ejecución del PCE	

Acreditación de la permanencia de la medida después de ejecutado el PCE, cuando aplique.	
--	--

Fuente: Guía de Alternativas de Compensación de Emisiones para Fuentes de Combustión (DFM, 2019) y elaboración propia.

Ejemplo de cálculo aplicado

Para ejemplificar el uso de la medida propuesta, se deberá presentar un ejemplo en donde se indique paso a paso el cálculo de la compensación de emisiones utilizando el mecanismo para una situación ficticia de compensación, tal y como aparece en los mecanismos ya presentados en este banco de proyectos.

7. Estructura de Informe de Programa de Compensación de Emisiones (PCE)

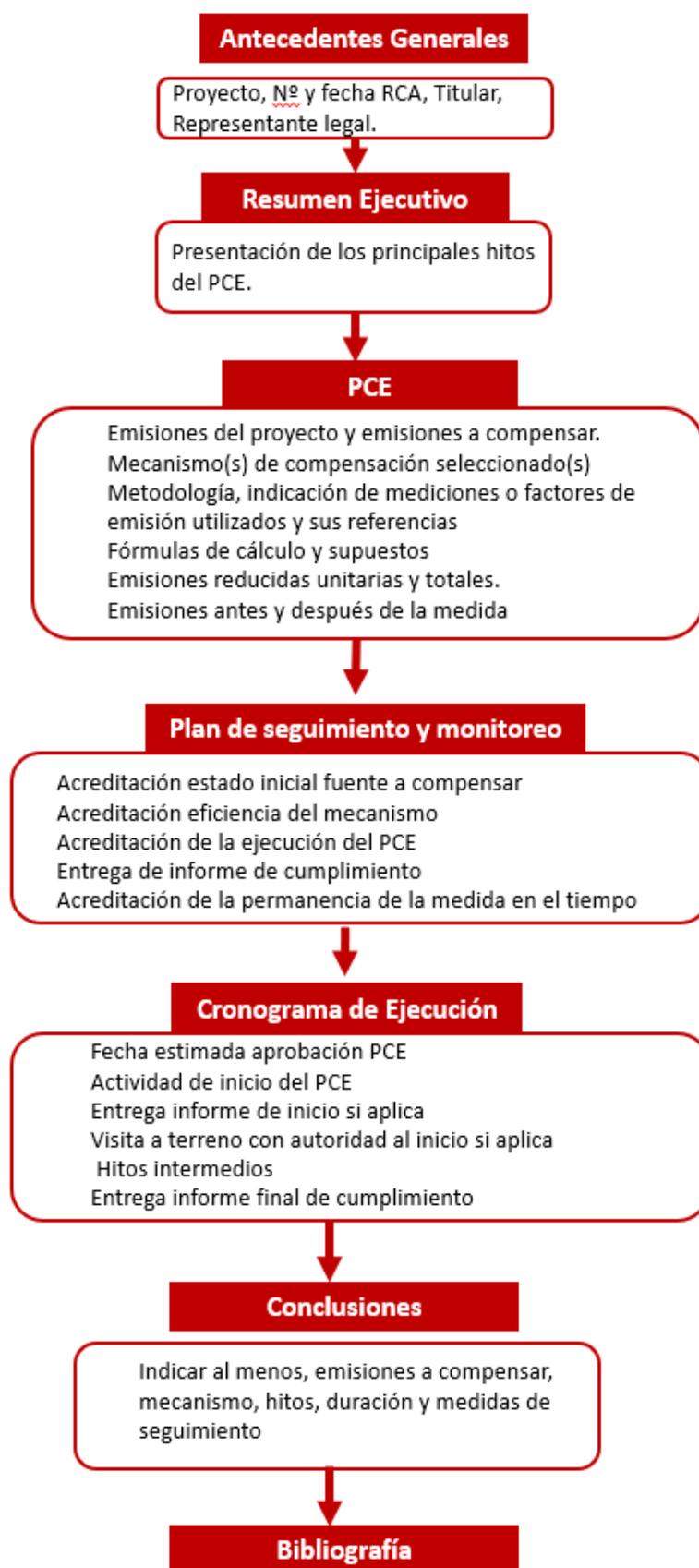
Se presentan en este Capítulo, los lineamientos generales y contenidos mínimos que todo informe de PCE deberá presentar ante la autoridad, en este caso, la SEREMI del Medio Ambiente de la región de Antofagasta.

Es recomendable que el informe siga una determinada estructura que a continuación se presenta, para facilitar la revisión y procesamiento de las solicitudes.

En cuanto a la entrega de un informe de PCE a la autoridad, se recomienda entregarlo en formato digital, en la oficina virtual de la SEREMI Medio Ambiente región de Antofagasta, email, oficinadepartesantofagasta@mma.gob.cl, el cual se deberá incluir carta conductora firmada por el titular, el informe en formato PDF y los anexos digitales que apliquen. De haber archivos superiores a 5 MW, se sugiere incluir un link que permita su descarga. Por su parte, desde la SEREMI de medio Ambiente, se deberá dar acuse recibo y confirmar la correcta descarga de los anexos.

A continuación, se presenta un diagrama con los contenidos del PCE.

Figura 7-1. Contenidos Programa de Compensación de Emisiones



A continuación, se presentan los contenidos a presentar en el PCE.

I Antecedentes generales

Antecedentes del Proyecto

Nombre del Proyecto:	
Número RCA	
Fecha RCA:	(DD/MM/AAAA)

Antecedentes del titular y su representante legal

Titular:	
RUT	
Domicilio:	
Fono:	
Representante legal:	
RUT:	
Domicilio Rep Legal:	
Fono representante legal	
Email	

Nota: Si el representante legal es el mismo que el que figura en el sistema del SEIA, no requiere presentar los antecedentes de personería, de lo contrario, deberá adjuntarlos.

Antecedentes del consultor (si aplica)

Empresa consultora	
RUT:	
Consultor:	
RUT:	
Fono:	

II Resumen ejecutivo

Los contenidos del resumen ejecutivo son los siguientes:

- ✓ *Nombre de proyecto, número de RCA*
- ✓ *Emisiones del proyecto y emisiones sometidas a compensación y las referencias donde se indica estos valores en la RCA.*
- ✓ *Mecanismo de compensación seleccionado y describirlo en forma breve.*
- ✓ *Reducción de emisiones por la aplicación de la medida.*
- ✓ *Describir en forma breve el plan de seguimiento asociado a la implementación del mecanismo de compensación seleccionado.*

- ✓ Indicar la duración del Programa de Compensación de Emisiones, en base al cronograma del mismo.

III Programa de compensación de emisiones

Los contenidos del programa de compensación de emisiones son los siguientes:

- ✓ **Emisiones del proyecto y emisiones a compensar.**

Se debe presentar las referencias donde se indica estos valores en la RCA. Presentar tabla con el o los contaminantes que deben compensar, su aplicación del 120% y en el caso de MP10 y MP2,5 diferenciando entre emisiones de combustión y las emisiones de resuspensión.

Un formato de presentación de las emisiones es el siguiente:

Tabla N° (según informe) Emisiones MP10 Combustión y MP10 Resuspensión a compensar

Año	MP10	Fase	Emisión MP10 (ton/año)	MP10 eq Al 120% (ton/año)	Porcentaje respecto de MP10 total
1	MP10 Resuspensión	Construcción			
	MP10 Combustión				
	MP10 Total				
...	MP10 Resuspensión				
	MP10 Combustión				
	MP10 Total				
n	MP10 Resuspensión				
	MP10 Combustión				
	MP10 Total				
N+1	MP10 Resuspensión	Operación			
	MP10 Combustión				
	MP10 Total				
...	MP10 Resuspensión				
	MP10 Combustión				
	MP10 Total				
Último año	MP10 Resuspensión				
	MP10 Combustión				
	MP10 Total				

Fuente: Resolución Exenta N°(según caso), indicando parte y número de página

Para realizar la compensación de emisiones, se debe considerar los años con las emisiones más altas en MP10 combustión y MP10 resuspensión, asegurando que se considera la situación más desfavorable.

✓ **Mecanismo(s) de compensación seleccionado(s).**

Se describe el o los mecanismos de compensación encaso de aplicar más de una determinada medida, por ejemplo, para combustión se puede considerar la sustitución de calefactores a leña y para MP10 resuspensión la pavimentación de calles. Se debe describir detalladamente la metodología de cálculo, tal como los ejemplos presentados en este banco de proyectos, indicando los factores de emisión utilizados, las referencias o las mediciones respectivas según corresponda. Se deben determinar las emisiones unitarias, el número total de equipos a intervenir y la duración en el tiempo de la medida según corresponda. En este inciso se deberá explicar con detalle la metodología de cálculo para estimar la compensación de emisiones con la alternativa propuesta, para lo que se deberán incluir fórmulas y referencias bibliográficas, entre otros elementos útiles. Es importante mencionar que se deberá explicar de forma separada la forma en que se determinarán los factores de emisión y niveles de actividad asociados a la alternativa presentada (ya sea por referencias bibliográficas, mediciones u otros).

✓ **Emisiones reducidas unitarias y totales**

Una vez definida la metodología de cálculo, con el fin de cuantificar la efectividad concreta de la medida de compensación, se debe presentar en este inciso la estimación de las emisiones atmosféricas reducidas aplicando la medida seleccionada, para así verificar que se cumple con las emisiones sometidas a compensación por parte del proyecto, tal y como se muestra a continuación:

1. Se debe establecer la emisión actual como emisión base respecto a la fuente de emisión seleccionada para realizar la compensación, referenciando los supuestos utilizados para realizar el cálculo.
2. En caso que la fuente esté sometida a un límite de emisión, el valor de la emisión base debe ser el menor valor entre la emisión actual y la emisión con el límite de emisión. En este banco de proyectos se presenta un ejemplo.
3. Luego, se deben estimar las emisiones considerando el mecanismo de compensación seleccionado.
4. Finalmente, a partir de la estimación de emisiones obtenida de los puntos 1 y 2, se debe determinar la diferencia entre ellas para cuantificar la reducción unitaria de emisión en base al mecanismo seleccionado. Luego, se deben dividir las emisiones totales a compensar por dicha diferencia para así determinar la cantidad de elementos requeridos para dar cumplimiento a las emisiones totales a compensar.

Para llevar a cabo la estimación de emisiones, se deben realizar mediciones por entidad ETFA. De no ser posible realizar mediciones, se puede utilizar un método de tipo indirecto, mediante el uso de factores de emisión y niveles de actividad, tal y como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\text{Emisión} = \text{Factor de emisión} \times \text{Nivel de actividad (a)}$$

Los factores de emisión se pueden establecer en base a referencias bibliográficas para fuentes del mismo tipo, mediciones realizadas directamente en la fuente, papers u otros.

Los niveles de actividad se pueden establecer en base a referencias bibliográficas, encuestas, mediciones u otros.

Tanto para los factores de emisión como para los niveles de actividad, se podrán citar los valores por defecto que se estipulen en este banco de proyectos y que se presentan oportunamente en sus respectivos anexos.

Así, para cuantificar la cantidad requerida de elementos de la medida de compensación seleccionada se deberá seguir la siguiente lógica de cálculo en base a lo presentado en los puntos 1, 2 y 3:

Emisión unitaria reducida = Emisión caso base – Emisión con mecanismo (b)

Elementos totales = Emisiones a compensar / Emisión unitaria reducida (c)

Cuando el resultado de la división presentada en la ecuación (c) sea un número decimal, este se deberá aproximar al entero superior más próximo.

Las emisiones a reducir deben ser presentadas en toneladas anuales por unidad de la medida que aplique. A modo de ejemplo, si la medida seleccionada consiste en hacer recambio de calefactores domiciliarios, la unidad será toneladas anuales de contaminante por calefactor. Por otro lado, si la medida seleccionada corresponde a la pavimentación de caminos, la unidad será toneladas anuales de contaminante por metro lineal pavimentado. Como último ejemplo, si la medida consiste en la chatarrización de un vehículo, la unidad será toneladas anuales de contaminante por vehículo chatarrizado, y así aplica para los otros mecanismos de compensación presentados en este banco de proyectos.

IV Plan de seguimiento

El objetivo general de todo plan de seguimiento corresponde a verificar lo siguiente:

A. Acreditar los supuestos sobre el estado inicial de la/s fuente/s involucrada/s en el PCE: la fuente sobre la cual se va a realizar la compensación de emisiones deberá coincidir con la fuente declarada para la cual se realizaron los cálculos.

B. Acreditar la correcta ejecución del PCE y su mantención en el tiempo: se deberá verificar la implementación del PCE y, en los casos que corresponda, el estado de las fuentes involucradas en el PCE durante el período de tiempo exigido en la aprobación del mismo.

C. Acreditar la eficiencia del mecanismo de compensación seleccionado: en los casos que corresponda, se deberá verificar la eficiencia del mecanismo de compensación por medio de mediciones, certificados u otros.

D. Asegurar los resultados en el tiempo, en caso de proyectos cuyas emisiones compensadas son permanentes, lo cual puede significar que se requiera realizar un análisis de resultados años después de entregado el informe de implementación.

Lo anterior, se puede resumir en la siguiente tabla:

Tabla 3 Resumen de medios de acreditación

Ítem	Forma de acreditación
Acreditación de estado inicial de fuente a compensar	
Acreditación de la eficiencia del mecanismo.	
Acreditación de la ejecución del PCE	
Acreditación de la permanencia de la medida después de ejecutado el PCE, cuando aplique.	

Con el fin de dar cumplimiento a lo anterior, independientemente del mecanismo de compensación de emisiones seleccionado, dentro del plan de seguimiento se considerará lo siguiente:

I. Al menos se deberá entregar un informe a la Seremi del Medio Ambiente al inicio y otro informe al final de la implementación del PCE.

II. A los informes comprometidos durante el seguimiento, se tendrá que adjuntar documentación firmada por el/los beneficiario/s en donde se constate la explicación de los motivos del PCE a el/los beneficiario/s, la recepción conforme de el/los mecanismo/s y la capacitación en el uso del mismo.

III. El informe final de seguimiento deberá incluir los archivos digitales que contengan información relevante georreferenciada del programa de compensación de emisiones.

Por su parte, dependiendo del tipo de PCE, la autoridad podrá determinar la necesidad de realizar visitas a terreno en conjunto con el titular para constatar el inicio o término del PCE (o ambos). Dicha disposición quedará establecida en la resolución exenta de aprobación del PCE del proyecto y el titular deberá tener la disponibilidad de asistir a visitas a terreno en conjunto con profesionales de la autoridad para verificar la correcta implementación del PCE si así lo indica su resolución exenta de aprobación.

Si bien los tres lineamientos presentados anteriormente corresponden a los contenidos generales que deberá tener un plan de seguimiento, existen documentos que los titulares tendrán que incluir para acreditar la correcta implementación del PCE que aplican a cada mecanismo de compensación de emisiones de manera específica. Por lo que, de acuerdo a cada anexo de mecanismos de compensación presentados en este banco de proyectos, el titular deberá revisar el o los documentos adicionales que deberán incluir, dependiendo del mecanismo de compensación seleccionado.

En el caso de que un titular desee proponer un mecanismo nuevo, distinto a los propuestos en este banco de proyectos, deberá consensuar el detalle de los documentos a presentar en el plan de seguimiento para dicho mecanismo con la Seremi del Medio Ambiente, considerando como mínimo los tres lineamientos presentados en esta sección

Por su parte, si bien se solicita como mínimo entregar un informe al inicio y otro al término del PCE, si el titular lo estima pertinente, dependiendo de la cantidad de elementos o trámites requeridos para ejecutar el PCE, podrá presentar más de dos informes, lo cual deberá ser justificado por el titular y posteriormente aprobado por la autoridad.

Es importante mencionar que una vez que se apruebe un PCE, este tendrá una resolución exenta de aprobación que indicará las condiciones del plan de seguimiento. Por lo que se espera que los titulares velen por la correcta implementación y ejecución de los PCE en base a los plazos que ellos mismos van a establecer, ya que la autoridad tendrá la facultad de fiscalizar la implementación de los PCE y velar por su seguimiento y correcta ejecución.

V Cronograma de ejecución del PCE

Se incluirá en este inciso una carta Gantt, que considere todas las etapas de implementación de la compensación de emisiones y la periodicidad con que se informará a la Superintendencia de Medio Ambiente y a la Seremi del Medio Ambiente sobre el estado de avance de las actividades comprometidas. Este cronograma deberá ser estimado en base a criterios del titular respecto a los plazos en los que podrá ejecutar el PCE.

Tabla 4 Propuesta de cronograma de ejecución del PCE

Actividad	Mes año	Mes año	Mes año	Mes año
Fecha estimada aprobación PCE				
Actividad de inicio de medidas del PCE				
Entrega de informe de inicio de actividades si aplica				
Visita a terreno con autoridad para el inicio si aplica				
Hitos intermedios relevantes si aplica				
Elaboración y entrega informe de cumplimiento PCE				

VI Conclusiones

Se presenta las conclusiones indicando al menos las emisiones totales a compensar, su mecanismo, hitos, duración y medidas de seguimiento.

VII Bibliografía

Se debe incluir la bibliografía utilizada para la elaboración del PCE, en formato estándar (APA).

8. Resumen de valores por defecto para este banco de proyectos de alternativas de compensación de emisiones

Tabla 8-1. Equivalencia MP10/MP2,5 Combustión versus MP10 resuspensión y SO2

Contaminante	Emisión equivalente MP2,5/MP10 Combustión (t/año)	Referencia
1 t/año MP10 Resuspensión	3	Valor propuesto a aplicar en PDA Calama
1 t/año SO2	0,2	Valor propuesto a aplicar en PDA Calama

Fuente: elaboración propia

Tabla 8-2. Valor por defecto factor de emisión calefactor a leña

	Unidad	valor
Factor de emisión calefactor a leña	g MP10/h	11,2
Nivel de actividad referencial	h/año	713
Reducción unitaria por equipo	ton MP10/año	0,008

Fuente: elaboración propia

Tabla 8-3. Resumen factores de emisión por defecto para vehículos pesados

Unidad	Tecnología	g/km	g/km	g/km
Diesel 7,5 – 16 t	Convencional	0,3344	0,3344	0,0055
	EURO I - 91/542/EEC I	0,2010	0,2010	0,0047
	EURO II - 91/542/EEC II	0,1040	0,1040	0,0047
	EURO III - 2000	0,0881	0,0881	0,0047
	EURO IV - 2005	0,0161	0,0161	0,0047
	EURO V - 2008	0,0161	0,0161	0,0047
	EURO VI	0,0008	0,0008	0,0047
Diesel 16 - 32 t	Convencional	0,4180	0,4180	0,0075
	EURO I - 91/542/EEC I	0,2970	0,2970	0,0063
	EURO II - 91/542/EEC II	0,1550	0,1550	0,0063
	EURO III - 2000	0,1300	0,1300	0,0063
	EURO IV - 2005	0,0239	0,0239	0,0063
	EURO V - 2008	0,0239	0,0239	0,0063
	EURO VI	0,0012	0,0012	0,0063
Diesel >32 t	Convencional	0,4910	0,4910	0,0089
	EURO I - 91/542/EEC I	0,3580	0,3580	0,0075
	EURO II - 91/542/EEC II	0,1940	0,1940	0,0075
	EURO III - 2000	0,1510	0,1510	0,0075
	EURO IV - 2005	0,0268	0,0268	0,0075
	EURO V - 2008	0,0268	0,0268	0,0075
	EURO VI	0,0013	0,0013	0,0075

Fuente: Guía para la estimación de emisiones atmosféricas en la Región Metropolitana (Seremi MA, 2020), a partir de la tabla 3-21 y 3-22 del capítulo 1.A.3.b Road Transport del documento EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook (EEA - 1.A.3.b, 2019c).

Tabla 8-4. Resumen factores de emisión por defecto para buses

Tipo	Tecnología	MP10	MP2,5	SO2
Unidad		g/km	g/km	g/km
Buses urbanos estándar	Convencional	0,9090	0,9090	0,0110
	EURO I - 91/542/EEC I	0,4790	0,4790	0,0090
	EURO II - 91/542/EEC II	0,2200	0,2200	0,0090
	EURO III - 2000	0,2070	0,2070	0,0090
	EURO IV - 2005	0,0462	0,0462	0,0090
	EURO V - 2008	0,0462	0,0462	0,0090
	EURO VI	0,0023	0,0023	0,0090
Buses interurbanos estándar	Convencional	0,4700	0,4700	0,0079
	EURO I - 91/542/EEC I	0,3620	0,3620	0,0074
	EURO II - 91/542/EEC II	0,1650	0,1650	0,0074
	EURO III - 2000	0,1780	0,1780	0,0074
	EURO IV - 2005	0,0354	0,0354	0,0074
	EURO V - 2008	0,0354	0,0354	0,0074
	EURO VI	0,0018	0,0018	0,0074

Fuente: Guía para la estimación de emisiones atmosféricas en la Región Metropolitana (Seremi MA, 2020), a partir de la tabla 3-23 y tabla 3-24 del capítulo 1.A.3.b Road Transport del documento. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook (EEA - 1.A.3.b, 2019c).

Tabla 8-5. Resumen niveles de actividad por defecto para fuentes móviles

Tipo de Vehículo	Nivel de Actividad (km/veh)
Camiones livianos	26.657
Camiones medianos	39.180
Camiones pesados	48.700
Buses	69.848

Fuente: Tabla 4-8 del Manual para el desarrollo de inventarios de emisiones atmosféricas (MMA, 2019).

Tabla 8-6. Acreditación Nivel de eficiencia lograda para sistemas de Post Tratamiento de Emisiones, certificados.

Identificación Sistema de Post Tratamiento de Emisiones			Nivel de Eficiencia	
Marca	Modelo / Tipo	Certificado N°	Pruebas Iniciales %	Pruebas Finales %
Donaldson	DPM-DPF con Catalizador de Serie 6300/ DPX, Medio filtrante: monolito de cordierita/ Método de Regeneración: pasivo mediante filtro catalizador	0010	89	86
Engine Control System (Unicat)	SC17H, Purifilter, Medio filtrante: Pared de Carburo Silicio/Método de Regeneración: pasivo mediante revestimiento catalítico	0011	96	99
Volvo	CRT, Número de parte 20562619 / DPF-CRT medio filtrante cordierita, método de regeneración pasivo con catalizador de platino mediante revestimiento catalítico	0012	87	90
FeelPure	FBC (Fuel Borne Catalyst), medio filtrante carburo silicio (SiC), método de regeneración pasivo mediante uso de aditivo catalizador CAM FBC	0013	94	92
Donaldson	DPF Muffler Estilo 6, número de serie: DPF005058/ DPF DPM, medio filtrante sustrato de cerámica, método de regeneración pasivo mediante recubrimiento catalítico	0014	92	93
Volvo	CRT, Número de parte 20562619 / DPF-CRT medio filtrante cordierita, método de regeneración pasivo con catalizador de platino mediante revestimiento catalítico	0015	92	92

Fuente: Link de descarga de tabla con el listado de sistemas de postratamiento de emisiones certificados: <https://www.mtt.gob.cl/archivos/5601>

Tabla 8-7. Comparación por especies: Mono especie y Mix en techos y muros

Especie	Captura MP2,5 [ug/cm2/h]	Captura MP2,5 [ug/cm2/h]	Captura MP2,5 [ug/cm2/h]	Captura MP2,5 [ug/cm2/h]
	Mono especie techo	Mix Techos	Mono especie muro	Mix Muros
S. Album	1,3	4	1,3	0,8
I. Spectabilis	0,5	2,8	0,6	0,7
S. Spurius P	0,4	2,8	0,5	1
Erigeron	0,2	0,7	0,3	0,6
I. Angustifolia	0,2	2,2	0,3	0,5
Relación Equivalencia MP10/MP2,5				
3				

Fuente: resultados investigación elaborada por profesionales de la Pontificia Universidad Católica de Chile (FONDEF ID15I10104, Vera et al., 2018). Relación equivalencia: elaboración propia

Tabla 8-8. Parámetros por defecto factores de emisión para resuspensión de MP10 por tránsito de vehículos en caminos no pavimentados

Formula f_e (g/km)	Parámetros
<p>Tipo de calle: no pavimentada con circulación dominada por vehículos pesados</p> <p>(W>2,7 ton)</p> $f_e = k \times 281,9 \times \left(\frac{s}{12}\right)^{0,9} \times \left(\frac{W}{2,72}\right)^{0,45}$	<p>k para MP₁₀: 1,5 k para MP_{2,5}: 0,15</p> <p>s: Contenido de material fino en la superficie [%] Valor determinado en este estudio = 3,2</p> <p>W: peso promedio de la flota que transita por las vías [t]</p>
<p>Tipo de Calle: no pavimentada con circulación dominada por vehículos livianos (W<=2,7 ton)</p> $f_e = \frac{k \times 281,9 \left(\frac{s}{12}\right) \left(\frac{S}{48,28}\right)^{0,5}}{\left(\frac{M}{0,5}\right)^{0,2}} - C$	<p>k para MP₁₀: 1,8 k para MP_{2,5}: 0,18 C para MP₁₀: 0,132493 C para MP_{2,5}: 0,101484</p> <p>S: velocidad media vehicular [km/h]</p> <p>M: Humedad del material superficial [%]. Valor determinado en este estudio = 0,2</p> <p>s: Contenido de material fino en la superficie [%]. Valor determinado en este estudio = 3,2.</p>

Fuente: Fórmulas según USEPA AP-42, valores de este estudio: elaboración propia.

La siguiente tabla, presenta la fórmula para determinar el factor de emisión de MP₁₀ y MP_{2,5} de resuspensión por la circulación de vehículos por calle pavimentada, que depende de la carga superficial de finos, que depende del rango de flujo vehicular.

Tabla 8-9. Fórmula para determinar el factor de emisión en calle pavimentada

Formula fe (g/km)	Parámetros
$f_e = k \times (sL)^{0,91} \times (W \times 1,1023)^{1,02}$	k para MP ₁₀ : 0,62 g/km
	k para MP _{2,5} : 0,15 g/km
	sL: carga superficial de finos [g/m ²]. Valores por defecto: 6,0 – para vías con flujo inferior a 500 veh/d 3,6– para vías con flujo entre 500 y 10.000 veh/d 2,4 – para vías con flujo superior a 10.000 veh/d
	W: peso promedio en toneladas de los vehículos que transitan por las vías

Fuente: Fórmulas según USEPA AP-42, valores de este estudio: elaboración propia.

Tabla 8-10. Parámetros de emisiones en bandejones y veredas

PARÁMETROS	UNIDAD	VALOR	Referencia
k MP10	Adimensional	0,953	Guía 2020 Estimación Emisiones Atmosféricas, sección erosión eólica
k MP2,5	Adimensional	0,146	
s: Contenido de finos de la superficie (%)	%	3,2	Determinado en este estudio
f porcentaje del tiempo con vientos superiores a 5,4 m/s	%	26,0	Datos obtenidos de estación meteorológica Hospital el Cobre de Calama
FE MP10: Factor de emisión	kg/ha-día	3,52	Aplicación de fórmula
FE MP 2,5: Factor de emisión	kg/ha-día	0,54	Aplicación de fórmula
Total de días al año	días/año	365	Días del año
Factor Emisión anual MP10 en 1 hectáreas	(t MP10 / año)/ ha	1,286	FE MP10 (kg/día) x 365/1000
Factor Emisión anual MP2,5 en 1 hectáreas	(t MP2,5 / año)/ ha	0,197	FE MP2,5 (kg/día) x 365/1000
Hectáreas por t MP10	ha / (t MP10 / año)	0,78	Valor inverso E MP10 para 1 ha
Hectáreas por t MP2,5	ha / (t MP2,5 / año)	5,07	Valor inverso E MP2,5 para 1 ha

Fuente: Según referencia indicada y elaboración propia.

9. Bibliografía

AGIES-MMA. (2016). Actualización para proyecto definitivo del análisis general del impacto económico y social del Plan de Prevención y Descontaminación de la Región Metropolitana. Departamento de Economía Ambiental - Ministerio de Medio Ambiente.

AIChE. (2013). Process burners 101. American Institute of Chemical Engineers.

AP42, US-EPA. (1993). Procedures for sampling surface/bulk dust loading. Appendix C.1. ARCADIS. (2018). Programa de compensación de emisiones de óxidos de nitrógeno (Actualización). Santiago.

BS Consultores. (2015). Informe final servicio de recopilación y sistematización de factores de emisión al aire para el Servicio de Evaluación Ambiental.

CDT. (2012). Propuesta de medidas para el uso eficiente de la leña en la Región Metropolitana de Santiago. Santiago: Ministerio de Energía.

CDT. (2015). Medición del consumo nacional de leña y otros combustibles sólidos derivados de la madera. CChC para el Ministerio de Energía.

Centro Mario Molina. (2009). Diseño integral de un programa de chatarrización de camiones. Santiago.

Conama. (2009). Programa piloto para el sistema de compensaciones de la Región Metropolitana - Diseño de metodologías de compensación de emisiones para chatarrización de fuentes móviles. Santiago: Luis Abdón Cifuentes Lira.

CONAMA Metropolitana de Santiago (2005). Plan Verde.

DFM - Del Favero Meneses Consultores Ambientales (2019). Guía de Alternativas de Compensación de Emisiones para Fuentes de Combustión. Santiago.

DICTUC. (2007). Actualización del inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos en la Región Metropolitana. Región Metropolitana: Comisión Nacional del Medio Ambiente.

DICTUC. (2009). Diseño de metodologías de compensación de emisiones para chatarrización de fuentes móviles. Santiago.

DTP. (2019). Informe de gestión 2018. Santiago.

EEA - 1.A.3.b. (2016). 1.A.3.b - Passenger cars, light commercial trucks, heavy-duty vehicles including buses and motorcycles. En EMEP/EEA, EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook (págs. 35-35).

EEA. (2016). EMEP/EEA Air pollutant emission inventory guidebook - Update July 2018. Luxemburgo: European Environment Agency - European Union.

ISP. (2012). Método CH-5G: Determinación de las emisiones de partículas de calefactores a leña medidas desde un túnel de dilución. Ministerio de Salud Pública, Gobierno de Chile.

ISPCH. (2012). Método CH-5: Determinación de las emisiones de partículas desde fuentes estacionarias. Instituto de Salud Pública, Ministerio de Salud, Gobierno de Chile.

Johannessen, T. (15 de 03 de 2015). Berlin: Direct Ammonia SCR: The Optimal Solution for Real Driving Emissions. Obtenido de Vert Forum: https://www.vert-dpf.eu/j3/images/pdf/VERT_FORUM_2018/day1/13_Johanessen-VERT-Forum-2018.pdf

Johannessen, T. (15 de 03 de 2018). Solid ammonia technology for near-zero polluting diesel vehicles. Obtenido de VERT: https://www.vert-dpf.eu/j3/images/pdf/VERT_FORUM_2018/day1/13_Johanessen-VERT-Forum-2018.pdf

Johnson, J., & Newton, J. (1996). Building green, a guide for using plants on roofs and pavement. Londres: The London Ecology Unit.

Ministerio del Medio Ambiente. (2019). Aprueba bases administrativas, técnicas y documentos anexos para la licitación pública del contrato denominado "Guía de alternativas de compensación de emisiones para fuentes de combustión".

MINVU. (2007). Programa de inversión pública para fomentar el reacondicionamiento térmico del parque construido de viviendas. Ambiente Consultores Ltda - PRIEN, Universidad de Chile.

MINVU. (2019). Fija nuevo texto de la Ordenanza General de la Ley General de Urbanismo y Construcciones. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile.

MMA. (2017). Manual para el desarrollo de inventarios de emisiones atmosféricas. Santiago: Departamento de Economía Ambiental, Ministerio de Medio Ambiente.

MMA. (2021). Establece Plan de Descontaminación Atmosférica para la Ciudad de Calama y su Área Circundante. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile.

Muñoz, D., & Barros, M. d. (2019). Por qué las azoteas vivas, verdes y activas son una estrategia de regeneración y resiliencia urbana atractiva, eficaz y rentable. Santiago: Azoteas Vivas - VerdeActivo.

NSW Environment Protection Authority - NSW EPA (2002). Green offsets for sustainable development. New South Wales Government, Australia.

Reşitoğlu, İ., Altinişik, K., & Keskin, A. (2015). The pollutant emissions from diesel-engine vehicles and exhaust aftertreatment systems. Merisn: Springer.

Seremi de Salud. (1994). Establece procedimiento de declaración de emisiones para fuentes estacionarias que indica. Santiago: Resolución 15.027.

Seremi MA. (2012). Guía para la estimación de emisiones atmosféricas de proyectos inmobiliarios para la Región Metropolitana. Santiago: Sección Asuntos Atmosféricos, Seremi Medio Ambiente Región Metropolitana.

SISTAM Ingeniería (2016). Banco Alternativas de Compensación de Emisiones de MP10 en el polígono de la zona saturada de Andacollo.

SMA. (2014). Evaluación del instrumento de compensación de emisiones Región Metropolitana. Santiago: División de Gestión e Innovación - Superintendencia de Medio Ambiente.

South Coast Air Quality Management District (2019). Rule 1610 – Regional Clean Air Incentives Market – RECLAIM (Disponible en <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/rule-book/reg-xvi/rule-1610-old-vehicle-scrapping.pdf>)

South Coast Air Quality Management District (2019). Rule 1612 – Regional Clean Air Incentives Market – RECLAIM (Disponible en <https://www.aqmd.gov/docs/default-source/rule-book/reg-xvi/rule-1612.pdf?sfvrsn=4>)

Subsecretaría de Transportes. (-). Guía para la instalación de sistemas de post tratamiento de emisiones en buses de Transantiago. Santiago: Gobierno de Chile - Centro de Control y Certificación Vehicular (3CV).

UACH. (2013). Encuesta de consumo energético para el sector residencial.

USACH. (2014). Actualización y sistematización del Inventario de Emisiones de Contaminantes Atmosféricos en la Región Metropolitana. Santiago.

USACH. (2014). Actualización y sistematización del Inventario de Emisiones de Contaminantes Atmosféricos en la Región Metropolitana. Santiago: Departamento de Física.

Vera, S.; Victorero, F., Viecco, M., Jorquera, G., Dobbs, C., Bustamante, W., Bonilla, C., Gironás, J. (2018) Solicitud Patente N°201803445 FONDEF ID15I10104. Pontificia Universidad Católica de Chile.

Viecco, M., Vera, S., Jorquera, H., Bustamante, W., Gironás, J., Dobbs, C., & Leiva, E. (2018). Potential of particle matter dry deposition on green roofs and living walls vegetation for mitigating urban atmospheric pollution in semiarid climates. MDPI - Sustainability.

Way, P., Viswanathan, K., Preethi, P., Gilb, A., Zambon, N., & Blaisdell, J. (2009). SCR performance optimization through advancements in aftertreatment packaging. SAE-Worldcongress.

Yang, J., YU, Q., & Gong, P. (2008). Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago. Elsevier.