



# DFM

Del Favero · Meneses  
CONSULTORES AMBIENTALES

Agregando valor a su evaluación ambiental

# GUÍA DE ALTERNATIVAS DE COMPENSACIÓN DE EMISIONES PARA FUENTES DE COMBUSTIÓN

— 611134-1-LE19 —



PREPARADO PARA  
Subsecretaría de Medio Ambiente,  
Seremi del Medio Ambiente, Región Metropolitana,

Diciembre 2019



**Contraparte técnica:** Seremi del Medio Ambiente Región Metropolitana.

**Equipo:**

Manuel Passalacqua Aravena.

Roberto Delgado López.

Diego Ramírez Arévalo.

Vanessa Dieguez Domel.

**Autores:** DFM Consultores Ambientales.

**Equipo:**

Benjamín Del Favero Tocornal.

María José Meneses Valenzuela.

Carlos Ross Arbea.

Nicolás Rebolledo Olave.

**Contacto:** [info@dfmconsultores.cl](mailto:info@dfmconsultores.cl) / [www.dfmconsultores.cl](http://www.dfmconsultores.cl)

Diciembre 2019

# ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	3
OBJETIVOS	4
CAPÍTULO 1 — ANTECEDENTES SOBRE COMPENSACIÓN DE EMISIONES SEGÚN EL DS N°31/2016	5
CAPÍTULO 2 — ESTRUCTURA DE LA GUÍA	11
ANEXO 1 — ESTRUCTURA DE INFORME DE PROGRAMA DE COMPENSACIÓN DE EMISIONES	13
ANEXO 2 — MECANISMO DE COMPENSACIÓN: RECAMBIO DE CALEFACTORES	23
ANEXO 3 — MECANISMO DE COMPENSACIÓN: CHATARRIZACIÓN DE MOTORES	33
ANEXO 4 — MECANISMO DE COMPENSACIÓN: FILTROS PARA FUENTES FIJAS INDUSTRIALES Y/O COMERCIALES	42
ANEXO 5 — MECANISMO DE COMPENSACIÓN: FILTROS DPF PARA FUENTES MÓVILES	46
ANEXO 6 — MECANISMO DE COMPENSACIÓN: IMPLEMENTACIÓN O REGENERACIÓN DE SISTEMA SCR PARA FUENTES MÓVILES	54
ANEXO 7 — MECANISMO DE COMPENSACIÓN: RECAMBIO O MEJORAS TECNOLÓGICAS PARA CALDERAS	63
ANEXO 8 — MECANISMO DE COMPENSACIÓN: TECHOS Y/O MUROS VERDES	69
ANEXO 9 — MECANISMO DE COMPENSACIÓN: PAVIMENTACIÓN DE CALLES	83
ANEXO 10 — RESUMEN COSTO EFECTIVIDAD DE MECANISMOS DE COMPENSACIÓN	94
ANEXO 11 — FORMATO DE INGRESO DE NUEVOS MECANISMOS DE COMPENSACIÓN	99
ANEXO 12 — MANUAL DE INSTRUCCIONES PARA ENTREGA DE ARCHIVOS DIGITALES (SHAPE)	102

ANEXO 13 — RESUMEN DE VALORES POR DEFECTO PARA ESTA GUÍA_	116
BIBLIOGRAFÍA _____	121
AGRADECIMIENTOS _____	124
ÍNDICE TABLAS _____	125
ÍNDICE FIGURAS _____	128

## INTRODUCCIÓN

Por medio del Decreto Supremo N°31 del 11 de octubre de 2016 del Ministerio del Medio Ambiente, se estableció el Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica (PPDA) para la Región Metropolitana de Santiago.

El objetivo del PPDA de la Región Metropolitana es dar cumplimiento a las normas primarias vigentes de calidad ambiental de aire, asociadas a los contaminantes material particulado respirable (MP10), material particulado fino respirable (MP2,5), ozono (O<sub>3</sub>) y monóxido de carbono (CO), en un plazo de diez años.

Si la Resolución de Calificación Ambiental (RCA) de un proyecto nuevo, modificación y/o ampliación de proyecto existente, a ejecutarse dentro de la Región Metropolitana, establece que este supera los límites de emisión establecidos en el artículo 64 del PPDA de la RM, se deberá

realizar la compensación de dichas emisiones atmosféricas.

De acuerdo al artículo 63 del capítulo VI.6.2 del DS N°31/2016, la compensación de emisiones se hará por medio de programas de compensación de emisiones (PCE), aprobados por la Seremi del Medio Ambiente y fiscalizados por la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA).

En esta Guía se presentan ocho 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.

## OBJETIVOS

### Objetivo general

El objetivo general de esta Guía es la presentación de mecanismos de compensación de emisiones para fuentes con combustión, para recomendar alternativas 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).

### 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) Presentar una estimación costo-efectiva de la compensación de emisiones para cada mecanismo propuesto.

## CAPÍTULO 1 — ANTECEDENTES SOBRE COMPENSACIÓN DE EMISIONES SEGÚN EL DS N°31/2016

Un 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 Región Metropolitana, 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 64 del PPDA de la RM, dando cumplimiento de este modo al DS 31/2016 que establece el Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica para la Región Metropolitana de Santiago (MMA, 2016).

Es muy importante destacar que el espíritu de esta Guía de alternativas de compensación de emisiones para fuentes de combustión es ser una herramienta de apoyo para los titulares que deban compensar sus emisiones.

Tomando en cuenta lo anterior, es necesario que los titulares de los proyectos tengan clara la importancia de realizar una correcta declaración de emisiones atmosféricas, considerando en la génesis del diseño del proyecto la necesidad de 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 64 del DS N°31/2016 (MMA, 2016).

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 harán que el proyecto idealmente no deba compensar sus emisiones y que, si debe

compensar, lo deban hacer por un monto equivalente a las emisiones que efectivamente el proyecto no pueda reducir considerando medidas.

Es muy importante mencionar que 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 63 del capítulo VI.6.2 del DS N°31/2016, la compensación de emisiones se hará por medio de programas de compensación de emisiones aprobados por la Seremi del Medio Ambiente y fiscalizados por la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA).

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 1.
2. La/s medida/s de compensación deben cumplir con los siguientes criterios:
  - a) **Medibles:** deben permitir cuantificar la reducción de emisiones que se produzcan a consecuencia de ellas.

- b) **Verificables:** que generen una reducción de emisiones que se pueda cuantificar con posterioridad de la implementación.

- c) **Adicionales:** las medidas propuestas no deben responder 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 por particulares.

- d) **Permanentes:** la rebaja debe permanecer por el período en que el proyecto está obligado a reducir sus 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:

1. Solo se pueden compensar o ceder emisiones entre aquellas fuentes que

demuestren cumplir con los siguientes requisitos:

- a. Realizar la compensación entre fuentes o actividades con combustión.
  - b. Realizar la compensación entre una fuente con combustión que cede emisiones a una fuente o actividad sin combustión, pero no viceversa.
  - c. Realizar la compensación entre fuentes o actividades sin combustión.
- II. En ningún caso se pueden hacer valer emisiones cedidas por actividades o establecimientos que cierren o deban cerrar por incumplimiento de normativa ambiental o por término de vida útil.
- III. Las actividades emisoras que reduzcan emisiones solo 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.
- IV. Las compensaciones podrán realizarse entre distintos tipos de fuentes,

actividades y sectores económicos, siempre y cuando cumplan con los criterios anteriormente descritos.

Por otro lado, a efectos de la compensación de emisiones, aquellos proyectos existentes que con posterioridad a la entrada en vigencia del DS N°31/2016 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.

En términos legales, la compensación de emisiones se formalizará mediante un registro administrado por la Seremi del Medio Ambiente.

De acuerdo al artículo 64 del capítulo VI.6.2 del DS N°31/2016, todos aquellos proyectos y actividades que ingresen al SEIA deberán cumplir con las siguientes condiciones:

1. 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 1.

**Tabla 1 – Emisión máxima proyectos dentro de la Región Metropolitana**

Contaminante	Emisión máxima (t/año)
Material particulado respirable (MP10)	2,5
Material particulado fino (MP2,5)	2,0
Óxidos de nitrógeno (NO <sub>x</sub> )	8
Dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> )	10

Fuente: elaboración propia, en base a la tabla VI-14 del artículo 64 del DS N°31/2016.

La situación base corresponde a todas aquellas emisiones atmosféricas existentes dentro de la Región Metropolitana, 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°31/2016 o a la normativa ambiental vigente.

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.

Se entenderá por emisiones indirectas las que se generan exclusivamente por la nueva

actividad, como por ejemplo, las asociadas al aumento del transporte u otras actividades directamente relacionadas a la generación de productos y/o servicios del nuevo proyecto. En el caso de proyectos inmobiliarios también se considerarán como emisiones indirectas las asociadas al uso de calefacción domiciliaria.

De acuerdo al artículo 61 del DS N°31/2016, para contabilizar la reducción de emisiones, se podrán considerar las emisiones de fuentes de combustión en masa de gases precursores de material particulado secundario emitidos, considerando las conversiones que se indican en la tabla 2:

**Tabla 2 - Emisión equivalente MP2,5 por tonelada de contaminante**

Contaminante	Emisión equivalente MP <sub>2,5</sub> en toneladas año
1 t/año de SO <sub>2</sub>	0,34089
1 t/año de NO <sub>x</sub>	0,11757
1 t/año de NH <sub>3</sub>	0,11339

Fuente: elaboración propia a partir de la tabla IV-13 del artículo 61 del DS N°31/2016.

Para efectos de determinar la obligación a compensar, se deberá analizar la superación de la emisión máxima indicada

en la tabla 1, de acuerdo a los siguientes criterios:

- Primero se debe analizar el material particulado respirable fino (MP2,5), considerando las emisiones equivalentes, es decir, la suma de las emisiones del contaminante más la emisión de SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y/o NH<sub>3</sub> ponderadas por los factores de conversión presentados en la tabla 2.
- Luego, se debe analizar el caso del material particulado respirable (MP10), considerando las emisiones equivalentes, es decir, la suma de las emisiones del contaminante más la emisión de SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y/o NH<sub>3</sub> ponderadas por los factores de conversión presentados en la tabla 2.

emisión máxima equivalente de este último contaminante.

- d) En caso que no se superen las emisiones de MP2,5 equivalente ni la emisión máxima de MP10 equivalente, se deberá analizar si la emisión de SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub> superan el límite indicado para cada uno en la tabla 1 y compensar estas emisiones en caso de que lo superen.

En la hipótesis de los literales a, b y c no debe ser analizado el límite de emisión de SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> ya que dichas emisiones se consideran en base a su contribución al MP2,5.

Del resultado de este primer análisis:

- a) En caso que se supere al mismo tiempo la emisión máxima de MP2,5 equivalente y de MP10 equivalente, se deberá compensar la emisión máxima total de material particulado equivalente.
- b) En caso que se supere la emisión máxima de MP2,5 equivalente, pero no se supere la emisión máxima de MP10 equivalente, se debe compensar la emisión máxima equivalente del primer contaminante.
- c) En caso de que no se supere la emisión máxima de MP2,5 equivalente, pero sí se supere la emisión máxima de MP10 equivalente, se deberá compensar la

Todos los proyectos o actividades y modificaciones que se sometan o deban someterse al SEIA, y que deban compensar sus emisiones, deberán presentar las emisiones evaluadas (al menos para MP, MP10, MP2,5, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO y NH<sub>3</sub>) de acuerdo a lo establecido en su RCA.

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.

2.- La compensación de emisiones será para el o los contaminantes en los cuales se sobrepase el valor referido en la tabla 1. Sin embargo al definir las medidas de compensación, se podrán utilizar las

conversiones para MP2,5 equivalente indicadas en la tabla 2.

3.- 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.

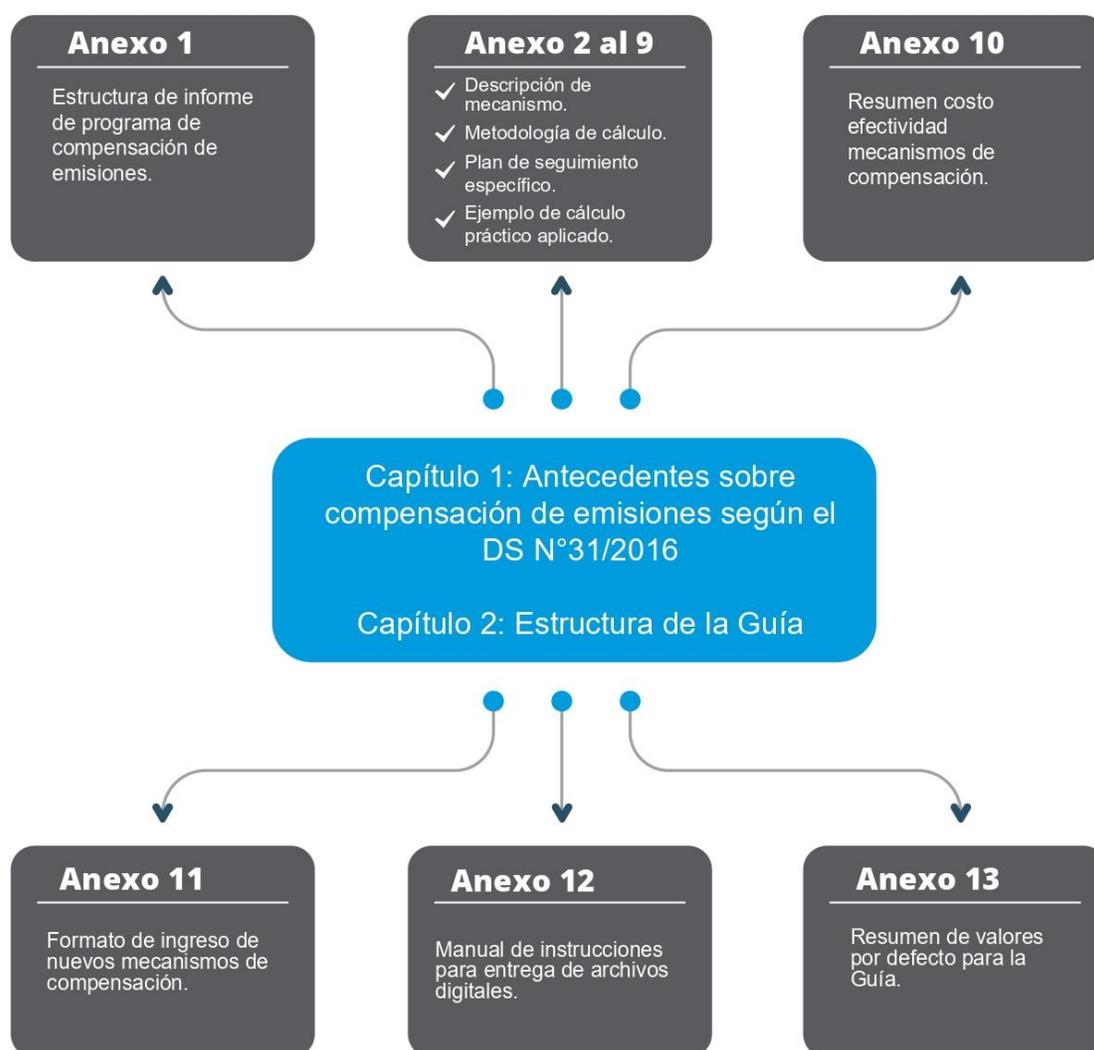
## CAPÍTULO 2 — ESTRUCTURA DE LA GUÍA

Esta Guía se compone de un total de 13 anexos, los cuales en caso de ser necesario podrán ser modificados en el futuro por parte de la autoridad, en base a su criterio y al avance de las tecnologías presentes en

Chile para ejecutar programas de compensación de emisiones.

En la figura 1 presenta un diagrama resumen con la estructura de esta Guía:

Figura 1 – Diagrama estructura guía de alternativas de compensación de emisiones para fuentes de combustión



Fuente: elaboración propia.

A continuación, se presenta el detalle del contenido de los anexos de esta Guía:

El primer anexo de la Guía define los contenidos mínimos y la estructura general que deberá tener un informe de programa de compensación de emisiones (PCE).

Del segundo al noveno anexo, se presentan los mecanismos de compensación de emisiones. En cada uno de estos anexos, se presenta para cada mecanismo su descripción, sus principales ventajas y desventajas, la metodología de cálculo de compensación de emisiones, su plan de seguimiento específico y un ejemplo de cálculo. A continuación, se presentan los mecanismos de compensación de emisiones incluidos en esta guía:

1. Recambio de calefactores.
2. Chatarización de motores.
3. Filtros para fuentes fijas industriales y/o comerciales.
4. Filtros DPF para fuentes móviles.
5. Regeneración de sistema SCR para fuentes móviles.
6. Recambio o mejoras tecnológicas para calderas domiciliarias e industriales.
7. Techos y/o muros verdes.
8. Pavimentación de calles.

En el décimo anexo se presenta un resumen costo-efectivo de la compensación de

emisiones para cada uno de los mecanismos de compensación de emisiones.

El décimo primer anexo, contiene el formato y los lineamientos a seguir para el ingreso de nuevos mecanismos de compensación, considerando que en un futuro algunos mecanismos podrían quedar obsoletos, o se desarrollen nuevas tecnologías que puedan ser implementadas como nuevos mecanismos de compensación. De este modo, el objetivo de este anexo es que los titulares y proveedores de tecnologías puedan presentar ante la autoridad un nuevo mecanismo, el que deberá ser evaluado y aprobado previo a ser publicado como un nuevo mecanismo aceptado para esta Guía. Así, la Guía no quedará con mecanismos fijos, sino que se irá actualizando en el tiempo.

El décimo segundo anexo corresponde a un manual de instrucciones para orientar a los titulares a crear archivos digitales entregables en formato SHAPE, los que permitirán a la autoridad dar seguimiento a la implementación de los mecanismos de compensación de emisiones, con información georreferenciada.

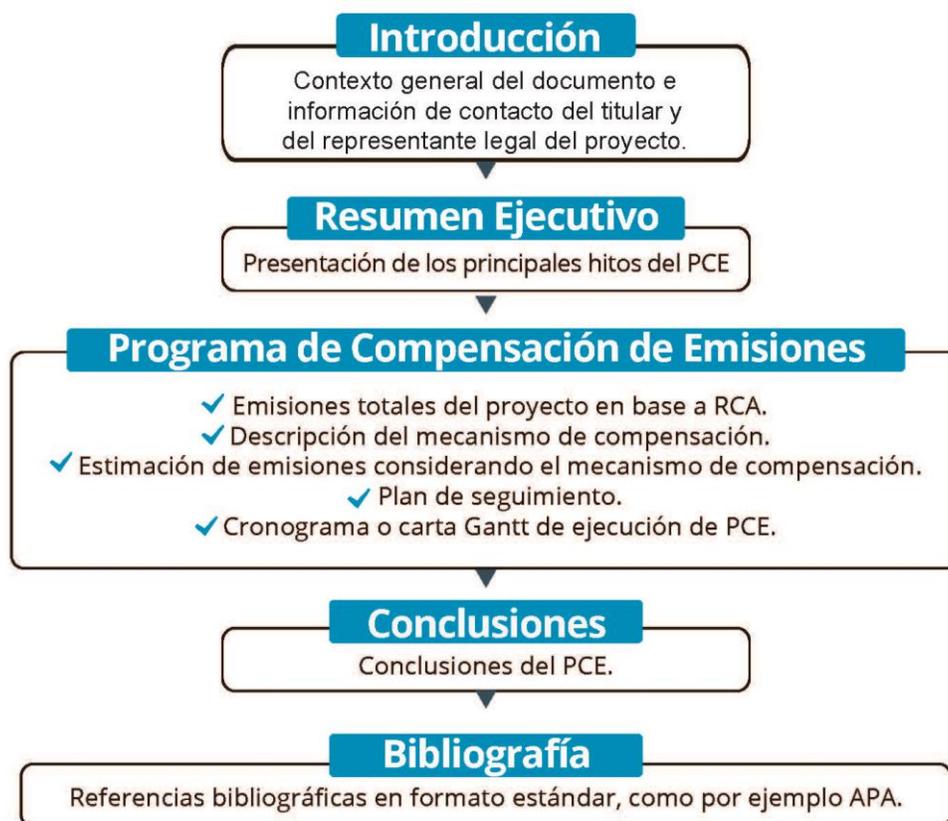
Por último, el décimo tercer anexo corresponde a un resumen de los factores de emisión y niveles de actividad a considerar como parámetros por defecto para realizar cálculos de compensación de emisiones.

## ANEXO 1 – ESTRUCTURA DE INFORME DE PROGRAMA DE COMPENSACIÓN DE EMISIONES

A continuación, en la figura 2 se presentan 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 Metropolitana.

Figura 2 – Diagrama estructura y contenidos mínimos para un PCE



Fuente: elaboración propia.

En cuanto a la entrega de un informe de PCE a la autoridad, se recomienda entregarlo en formato digital (CD), en el cual se deberá incluir el informe en formato PDF y los anexos digitales que apliquen.

### Introducción (máximo 1 página)

El informe del PCE debe comenzar con una breve introducción que dé cuenta del contexto general que da lugar a la elaboración del documento, el cual debe considerar:

- I. Nombre del proyecto.
- II. Número de RCA.
- III. Descripción del proyecto y ubicación.
- IV. Nombre de el/los contaminante/s a compensar.

importante mencionar que los datos presentados deberán corresponder al titular del proyecto y coincidir con lo que esté vigente en el SEIA. Estos datos serán utilizados como conducto de comunicación durante el proceso de evaluación y resolución del PCE.

Además, en esta sección se deben entregar los antecedentes del titular del proyecto y de su representante legal. Es

En la tabla 3 y la tabla 4 se presenta la información a completar tanto para el titular como para el representante legal:

**Tabla 3 – Antecedentes del titular**

Razón social:
R.U.T:
Domicilio:
Giro:
Teléfono:
Email:

Fuente: elaboración propia.

**Tabla 4 – Antecedentes del representante legal**

Nombre
R.U.T:
Domicilio:
Teléfono:
Email:

Fuente: elaboración propia.

### Resumen ejecutivo (máximo 1 página)

En el resumen ejecutivo del informe se deberán presentar los principales hitos del PCE, con el fin de que la autoridad pueda verificar en forma resumida las principales características del programa y que este cumpla con lo requerido para compensar las emisiones del proyecto.

A modo de ejemplo, se muestran a continuación algunos parámetros clave a presentar en el resumen ejecutivo del informe:

- I. Indicar las emisiones del proyecto y emisiones sometidas a compensación, en base a la RCA. Establecer el mecanismo de compensación seleccionado y describirlo en forma breve.
- II. Definir la reducción unitaria de emisiones por la aplicación de la medida y presentar la cantidad de elementos necesarios según el mecanismo de compensación seleccionado para con el PCE.
- III. Describir en forma breve el plan de seguimiento asociado a la implementación del mecanismo de compensación seleccionado.
- IV. Estimar la duración del PCE, en base al cronograma del mismo.

proyecto sometido a evaluación en el SEIA para cada una de sus fases (construcción, operación y cierre) y para cada uno de los contaminantes requeridos en el artículo 61 del DS N°31/2016. Dichas emisiones, corresponden a las emisiones atmosféricas según lo descrito en la RCA que calificó de manera ambientalmente favorable al proyecto. Para tal efecto, se deberá citar en forma literal el punto o considerando que establece las emisiones del proyecto y las emisiones sometidas a compensación según lo que establezca la RCA.

A modo de resumen, se debe presentar una tabla con los parámetros de interés mencionados, considerando únicamente los años en los que el proyecto debe compensar sus emisiones, tal y como se muestra en el ejemplo en la tabla 5. Es importante mencionar que si la compensación requerida se repite en varios años, basta con colocar una fila y en la columna año colocar los años en que se repite (del año X al año Y):

### Programa de compensación de emisiones

#### Emisiones del proyecto

En este inciso se deben presentar las emisiones por año declaradas por el

**Tabla 5 – Resumen años a compensar emisiones por el proyecto**

Año	Fase/s	Contaminante	Emisión (t/año)	Emisión al 120% (t/año)	Fracción de emisiones por combustión %
1					
2					
...					
n					

Fuente: elaboración propia.



En la columna “fase” se deberá indicar si corresponde a la fase de construcción, operación o cierre o combinación de ellas; en la columna “contaminante” se deberá indicar el contaminante sometido a compensación; en la columna “emisión” se deberá indicar la emisión del proyecto de acuerdo a lo establecido en su RCA; en la columna “emisión al 120%” se deberá indicar el valor equivalente al 120% de las emisiones del proyecto de acuerdo a lo establecido en su RCA; y en la columna “fracción de emisiones por combustión” se deberá indicar el porcentaje total de las emisiones que equivale a emisiones por combustión.

### **Descripción de la alternativa seleccionada para compensar emisiones**

A partir de la identificación de las emisiones sometidas a compensación, se debe describir en este inciso la medida de compensación seleccionada, entregando el detalle y los motivos que la hacen apta para ser utilizada como mecanismo de compensación. Para esto, una vez descrita la medida de compensación como tal, hay que explicar en forma breve el cumplimiento de los criterios establecidos en el artículo 63 del DS N°31/2016 tal y como se muestra en la tabla 6:

**Tabla 6 – Resumen cumplimiento de criterios de medida de compensación**

Criterio	Detalle
<b>Medible:</b> que permita cuantificar la reducción de las emisiones que se produzca a consecuencia de ellas.	
<b>Verificable:</b> que genere una reducción de emisiones que se pueda cuantificar con posterioridad de la implementación.	
<b>Adicional:</b> el mecanismo no responde a otras obligaciones a que esté sujeto el titular, o bien, no corresponde a otra obligación que conocidamente será llevada a efecto por la autoridad pública o particulares.	
<b>Permanente:</b> la rebaja permanezca por el período en que el proyecto está obligado a reducir emisiones.	

Fuente: elaboración propia.

### Metodología de cálculo para la estimación de emisiones de la medida de compensación

Una vez descrita la medida de compensación, se debe presentar en este inciso la metodología de cálculo utilizada para la estimación de emisiones de la medida de compensación.

Para explicar la metodología de cálculo se tienen que presentar las ecuaciones, fórmulas y/o supuestos necesarios para dar a entender la forma en la que se estimarán las emisiones.

### Estimación de emisiones de la medida de compensación

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 un caso base respecto a la fuente de emisión seleccionada para realizar la compensación, referenciando los supuestos utilizados para realizar el cálculo.

2 Luego, se deben estimar las emisiones considerando el mecanismo de compensación seleccionado.

compensar por dicha diferencia para así determinar la cantidad de elementos requeridos para dar cumplimiento a las emisiones totales a compensar.

3 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

Para llevar a cabo la estimación de emisiones, 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:

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

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.

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

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

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:

$$\text{Emisión}_{\text{unitaria reducida}} = \text{Emisión}_{\text{caso base}} - \text{Emisión}_{\text{con mecanismo}} \quad (b)$$

$$\text{Elementos totales} = \frac{\text{Emisiones a compensar}}{\text{Emisión}_{\text{unitaria reducida}}} \quad (c)$$

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

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

Las emisiones a reducir deben ser presentadas en toneladas anuales por unidad de la medida

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 esta Guía.

Una vez presentado el cálculo de emisiones y la cantidad de elementos requeridos para dar cumplimiento a la compensación de emisiones, se deberá presentar un resumen de los cálculos realizados, tal y como se muestra en el ejemplo presentado en la tabla 7:

**Tabla 7 – Ejemplo resumen de cálculos**

Parámetro	Valor
Emisiones totales a compensar (t/año)	
Emisiones caso base (t/año-elemento)	
Emisiones con mecanismo de compensación (t/año-elemento)	
Emisiones reducidas (t/año-elemento)	
Cantidad de elementos mecanismo de compensación	
Emisiones compensadas (t/año)	

Fuente: elaboración propia.

El resumen presentado servirá para verificar si el mecanismo elegido logra cumplir con compensar un monto mayor o igual a las emisiones totales a compensar, de acuerdo a lo establecido en la RCA del proyecto.

### Plan de seguimiento de la compensación de emisiones

Para que la Seremi del Medio Ambiente pueda dar seguimiento a la implementación del mecanismo de compensación seleccionado por el titular de acuerdo a lo descrito en el PCE y su correcta mantención en el tiempo, se debe presentar en este inciso el 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.

como crear los archivos SHAPE solicitados.

- 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.

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 en formato SHAPE que contengan información relevante georreferenciada del programa de compensación de emisiones. Para esto, se adjunta en el anexo 12 de esta Guía un manual para orientar a los titulares paso a paso

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 esta Guía, 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 esta Guía, 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.

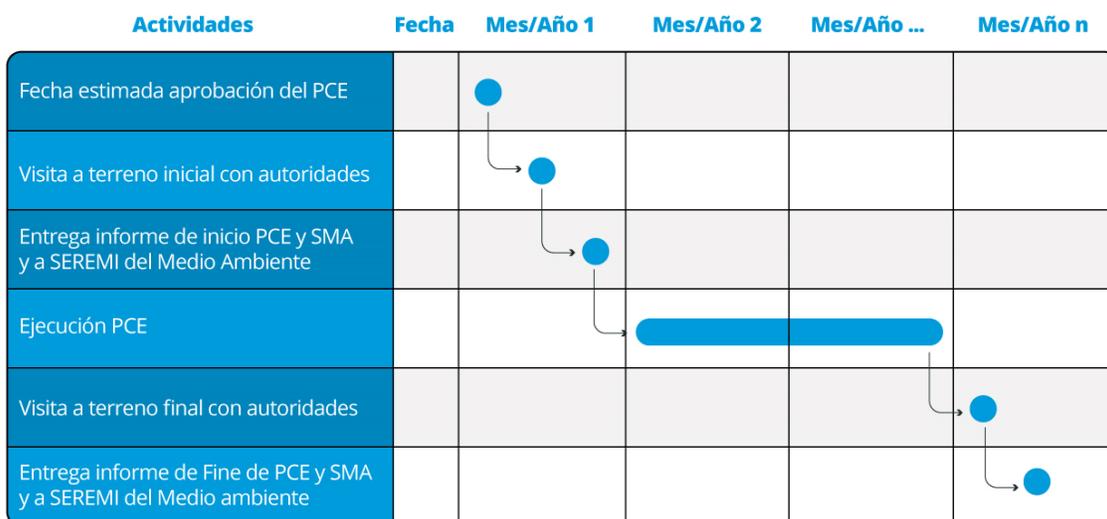
Es importante mencionar que una vez que se apruebe un PCE, este tendrá una resolución exenta de aprobación (RE) propia (aparte de la RCA del proyecto). Por lo que se espera que los titulares velen por la correcta implementación y ejecución de los PCE en base a los plazos que ellos mismos van a establecer,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

### Cronograma de ejecución del programa de compensación

Para establecer en forma clara los tiempos asociados a la 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.

Se presenta en la figura 3 un ejemplo de carta Gantt para un PCE:

**Figura 3 – Ejemplo carta Gantt PCE**



Fuente: elaboración propia.

## **Bibliografía**

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

## ANEXO 2 – MECANISMO DE COMPENSACIÓN: RECAMBIO DE CALEFACTORES

### Descripción del mecanismo y justificación

Este mecanismo de compensación consiste en realizar el recambio de calefactores a leña antiguos actualmente existentes dentro de la Región Metropolitana por calefactores modernos que generen menos emisiones de contaminantes atmosféricos o que no las generen.

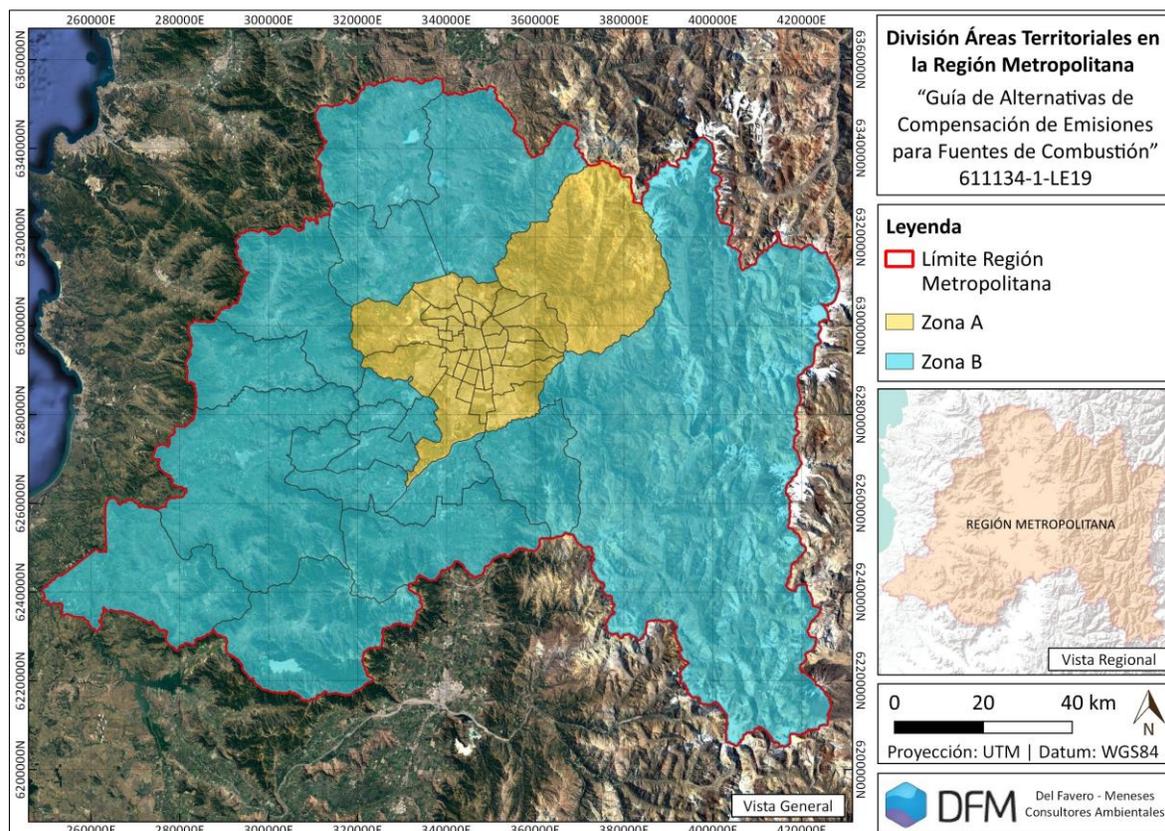
El artículo 73 del DS N°31/2016 establece que la Región Metropolitana se divide en dos áreas territoriales, tal y como se muestra en la tabla 8 y la figura 4:

**Tabla 8 – División áreas territoriales en la Región Metropolitana**

Zona A	Zona B
Comprende la Provincia de Santiago: Cerrillos, Cerro Navia, Conchalí, El Bosque, Estación Central, Huechuraba, Independencia, La Cisterna, La Granja, La Florida, La Pintana, La Reina, Las Condes, Lo Barnechea, Lo Espejo, Lo Prado, Macul, Maipú, Ñuñoa, Pedro Aguirre Cerda, Peñalolén, Providencia, Pudahuel, Quilicura, Quinta Normal, Recoleta, Renca, San Miguel, San Joaquín, San Ramón, Santiago y Vitacura, además de San Bernardo y Puente Alto.	Comprende las comunas de las Provincias de Chacabuco, Cordillera, Talagante, Melipilla y Maipo: Alhué, Buin, Calera de Tango, Colina, Curacaví, El Monte, Isla de Maipo, Lampa, María Pinto, Melipilla, Padre Hurtado, Paine, Peñaflor, Pirque, San Pedro, San José de Maipo, Talagante y Tiltill, con la excepción de las comunas de San Bernardo y Puente Alto.

Fuente: elaboración propia.

**Figura 4 – División áreas territoriales en la Región Metropolitana**



Fuente: elaboración propia.

De acuerdo al artículo 74 del DS N°31/2016, en la zona A está prohibido el uso de calderas de calefacción de uso domiciliario (cuando su uso sea para una casa habitación de forma individual), calefactores y cocinas, que utilicen o puedan utilizar leña, carbón vegetal y otros derivados de la madera, para cualquier fin. En esta zona solo está permitido el uso de artefactos a *pellet* de madera, siempre y cuando cumplan con el límite de emisión establecido en el artículo 83 del mismo decreto.

Por su parte, de acuerdo al artículo 75 del DS N°31/2016, en la zona B solo se

prohíbe el uso de calefactores nuevos que no cumplan con el límite de emisión establecido en el artículo 83 del mismo decreto, pero no se prohíbe el uso de calefactores a leña.

A partir de lo anterior, se establece que el mecanismo de recambio de calefactores podrá ser implementado únicamente en comunas pertenecientes a la zona B de la Región Metropolitana.

Por último, en el artículo 82 del DS N°31/2016 se establece que para la compensación de emisiones se fomentará el

retiro, recambio y chatarrización de calefactores y cocinas que utilicen o puedan utilizar leña, carbón vegetal y otros derivados de la madera. Considerando lo anterior, este mecanismo responde a la lógica establecida en el artículo mencionado, lo que justifica su inclusión como alternativa de compensación de emisiones para fuentes de combustión.

En la tabla 9 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 9 – Resumen cumplimiento de criterios mecanismo de compensación: recambio de calefactores**

Criterio	Detalle
Medible	Es factible realizar mediciones directamente en la fuente.
Verificable	Para verificar la reducción de emisiones, se pueden realizar mediciones antes y después de instalar el nuevo calefactor. En el caso de que el recambio sea por un calefactor <i>split</i> eléctrico, se puede verificar el continuo y correcto uso del equipo con visitas a terreno.
Adicional	Un usuario de calefactor a leña en la zona B 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: elaboración propia.

## Ventajas y desventajas

A continuación, en la tabla 10 se listan las principales ventajas y desventajas del

mecanismo de compensación presentado:

**Tabla 10 – 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 intradomiciliaria en los hogares.</p>	<p>a) Dependiendo de la cantidad de calefactores a cambiar, su costo puede ser muy elevado.</p> <p>b) El mecanismo no tiene carácter de adicionalidad en la zona A de la Región Metropolitana.</p> <p>c) 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>

Fuente: 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 esta Guía, o algún otro documento debidamente referenciado.

De cualquier forma, en la tabla 11 se presenta el valor por defecto del factor de emisión para calefactor a leña para efectos de esta Guía:

**Tabla 11 - Valor por defecto factor de emisión calefactor a leña**

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

Fuente: elaboración propia, 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. A modo referencial, se presenta a continuación algunos documentos de referencia que podrán ser consultados y referenciados para determinar los niveles de actividad:

- I. *Medición del consumo nacional de leña y otros combustibles sólidos derivados de la madera* (CDT, 2015).
- II. *Actualización y sistematización del inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos en la Región Metropolitana* (USACH, 2014).
- III. *Encuesta de consumo energético para el sector residencial* (UACH, 2013).

- IV. *Propuesta de medidas para el uso eficiente de la leña en la Región Metropolitana de Santiago.* (CDT, 2012).

Además de las fuentes bibliográficas para buscar niveles de actividad, se presenta en la tabla 12 el valor por defecto a considerar para efectos de esta Guía:

**Tabla 12 - Valor por defecto niveles de actividad calefactores a leña en la Región Metropolitana**

Región	Promedio h/año-equipos
Región Metropolitana	2.008

Fuente: elaboración propia, a partir de la tabla 166 del documento *Medición del consumo nacional de leña y otros combustibles sólidos derivados de la madera* (CDT, 2015).

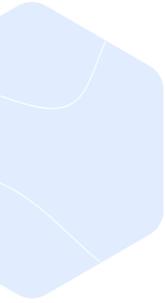
### Consideraciones importantes

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

- El artículo 77 del DS N°31/2016 prohíbe dentro de toda la Región Metropolitana de Santiago el uso de salamandras, braseros, chimeneas de hogar abierto, calefactores hechizos y otros artefactos similares, que utilicen o puedan utilizar leña, carbón vegetal y otros derivados de la madera, para cualquier fin. En base a lo anterior, para la estimación de emisiones del caso base y la determinación de la cantidad de calefactores a cambiar, no se podrán utilizar factores de emisión asociados a ninguno de los calefactores mencionados, ya que se asume que su uso está prohibido.
- El artículo 86 del DS N°31/2016 establece que toda la leña que sea

comercializada en la zona sujeta al plan debe cumplir con los requerimientos técnicos de la Norma NCh2907, de acuerdo a la especificación de “leña seca” establecida en la tabla 1 de dicha norma. Considerando lo anterior, para el cálculo de factores de emisión no se podrán utilizar factores asociados al uso de leña húmeda, entendiendo que el uso de este tipo de leña está prohibido.

- 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) y comprobar una emisión de material particulado menor o igual a 2,5 (g/h), de acuerdo a lo establecido en el artículo 83 del DS N°31/2016.

- 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 5 de esta Guía, 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 13:

**Tabla 13 - Acreditación plan de seguimiento: recambio de calefactores**

Ítem	Forma de acreditación
<b>Acreditación supuesto de estado inicial de fuente a compensar</b>	<p>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.</p> <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 <i>pellet</i>, pero no es requisito para tecnologías cero emisión, como por ejemplo los <i>split</i> 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>
<b>Acreditación de la ejecución del PCE</b>	

Fuente: elaboración propia.

## Ejemplo de cálculo aplicado

Luego de obtener su RCA favorable, un proyecto debe compensar  $15,0 \frac{t}{año}$  de óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ). 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.

Considerando los factores de equivalencia presentados en la tabla IV-13 del artículo 61 del DS N°31/2016, se determina la cantidad de material particulado fino (MP2,5) equivalente al total de emisiones a compensar:

$$\text{Emisiones a compensar MP2,5eq} = \text{Emisiones a compensar NO}_x \cdot 0,11757$$

$$\text{Emisiones a compensar MP2,5eq} = 15,0 \frac{t}{año} \cdot 0,11757$$

$$\text{Emisiones a compensar MP2,5eq} = 1,76 \frac{t}{año}$$

De acuerdo al cálculo, el proyecto podrá realizar la compensación por  $1,76 \frac{t}{año}$  de material particulado fino (MP2,5eq) que equivalen a las  $15,0 \frac{t}{año}$  de óxidos de nitrógeno que debe compensar de acuerdo a su RCA.

Para determinar los factores de emisión y niveles de actividad a utilizar para el cálculo, se han considerado los valores por

defecto presentados en la tabla 11 y la tabla 12, respectivamente.

A partir de los factores de emisión y nivel de actividad presentados, 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 esta Guía):

$$\text{Emisión}_{\text{Caso Base}} = FE_{\text{Base}} \cdot NA_{\text{Base}}$$

$$\text{Emisión}_{\text{Caso Base}} = 11,2 \left( \frac{g \text{ MP2,5}}{h} \right) \cdot 2.008 \left( \frac{h}{año - equipo} \right) \cdot \frac{1 t}{10^6 g} = 0,022 \left( \frac{t \text{ MP2,5eq}}{año - equipo} \right)$$

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:

Reducción unitaria = Emisión caso base – Emisión con mecanismo

$$\text{Reducción unitaria} = 0,022 \left( \frac{\text{t MP2,5eq}}{\text{año} - \text{equipo}} \right) - 0 \left( \frac{\text{t MP2,5eq}}{\text{año} - \text{equipo}} \right) = 0,022 \left( \frac{\text{t MP2,5eq}}{\text{año} - \text{equipo}} \right)$$

$$\text{Calefactores a cambiar} = \frac{\text{Toneladas a compensar}}{\text{Reducción unitaria}}$$

$$\text{Calefactores a cambiar} = \frac{1,76 \left( \frac{\text{t MP2,5eq}}{\text{año}} \right)}{0,022 \left( \frac{\text{t MP2,5eq}}{\text{año} - \text{equipo}} \right)}$$

$$\text{Calefactores a cambiar} = 80 \text{ (equipos)}$$

A partir de los cálculos realizados, el proyecto deberá realizar el recambio de 80 calefactores antiguos doble cámara por calefactores *split* eléctricos dentro de alguna de las comunas de la zona B de la Región Metropolitana, para así dar cumplimiento a las toneladas totales a compensar de acuerdo a su RCA.

A modo de resumen, considerando los valores por defecto presentados, se establece que si se realiza el recambio de calefactores por calefactores *split* eléctricos para realizar la compensación de 1 t/año de MP2,5 se deberá realizar el recambio de 46 calefactores, de acuerdo al cálculo presentado a continuación:

$$\text{Emisión}_{\text{Caso Base}} = 11,2 \left( \frac{\text{g MP2,5}}{\text{h}} \right) \cdot 2.008 \left( \frac{\text{h}}{\text{año} - \text{equipo}} \right) \cdot \frac{1 \text{ t}}{10^6 \text{g}} = 0,022 \left( \frac{\text{t MP2,5eq}}{\text{año} - \text{equipo}} \right)$$

$$\text{Reducción unitaria} = 0,022 \left( \frac{\text{t MP2,5eq}}{\text{año} - \text{equipo}} \right) - 0 \left( \frac{\text{t MP2,5eq}}{\text{año} - \text{equipo}} \right) = 0,022 \left( \frac{\text{t MP2,5eq}}{\text{año} - \text{equipo}} \right)$$

$$\text{Calefactores a cambiar para compensar } 1 \frac{\text{t}}{\text{año}} \text{ de MP2,5eq} = \frac{1,0 \left( \frac{\text{t MP2,5eq}}{\text{año}} \right)}{0,022 \left( \frac{\text{t MP2,5eq}}{\text{año} - \text{equipo}} \right)}$$

$$\text{Calefactores a cambiar para compensar } 1 \frac{\text{t}}{\text{año}} \text{ de MP2,5eq} = 45,45 \text{ (equipos)} \sim 46 \text{ (equipos)}$$

## ANEXO 3 – MECANISMO DE COMPENSACIÓN: CHATARRIZACIÓN DE MOTORES

### Descripción del mecanismo y justificación

Este mecanismo de compensación consiste en realizar la chatarrización<sup>1</sup> de fuentes móviles, para así retirar de circulación vehículos antiguos con permiso de circulación vigente (dentro de la Región Metropolitana), que corresponden a vehículos que generan gran emisión de

contaminación atmosférica y que están obsoletos tecnológicamente.

En la tabla 14 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 14 – Resumen cumplimiento de criterios mecanismo de compensación: chatarrización de motores**

Criterio	Detalle
Medible	Es factible realizar mediciones directamente en la fuente a chatarrizar, específicamente en el Centro de Control y Certificación Vehicular (3CV).
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: elaboración propia.

<sup>1</sup> La chatarrización consiste en el proceso de desintegración total de un vehículo y su motor y su posterior conversión en chatarra.

## Ventajas y desventajas

mecanismo de compensación presentado:

A continuación, en la tabla 15 se listan las principales ventajas y desventajas del

**Tabla 15 – Ventajas y desventajas mecanismo de compensación: chatarrización de motores**

Ventajas	Desventajas
<p>a) Reducción de una fuente importante de MP y NO<sub>x</sub>.</p> <p>b) Fácil implementación, seguimiento y verificación de eliminación del motor.</p> <p>c) Promueve la eliminación de fuentes antiguas, contribuyendo a la renovación del parque vehicular en la RM.</p>	<p>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.</p> <p>b) La compensación se extiende solo durante la vida útil remanente de los camiones a chatarrizar.</p>

Fuente: elaboración propia.

## Metodología de cálculo de compensación

*Inmobiliarios para la Región Metropolitana* (Seremi MA, 2012).

### 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:

- *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook* (EEA, 2016).

- *Manual para el desarrollo de inventarios de emisiones atmosféricas* (MMA, 2017)
- *Guía para la estimación de emisiones atmosféricas de proyectos*

Para efectos de la Guía, 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 16 y la Tabla 17 se presenta un resumen con los factores para contaminantes de interés para realizar compensaciones, para vehículos pesados y para buses, respectivamente:

**Tabla 16 – Resumen factores de emisión por defecto para vehículos pesados<sup>2</sup>**

Tipo		MP2,5	NO <sub>x</sub>	NH <sub>3</sub>
Unidad	Tecnología	g/km	g/km	g/km
Nota		MP2,5 = MP10 = MPS	NO <sub>2</sub> equivalente	-
<b>Diesel 7,5 - 16 t</b>	Convencional	0,3344	8,92	0,0029
	EURO I - 91/542/EEC I	0,201	5,31	0,0029
	EURO II - 91/542/EEC II	0,104	5,50	0,0029
	EURO III - 2000	0,0881	4,30	0,0029
	EURO IV - 2005	0,0161	2,65	0,0029
	EURO V - 2008	0,0161	1,51	0,011
	EURO VI	0,0008	0,291	0,009
<b>Diesel 16 - 32 t</b>	Convencional	0,418	10,7	0,0029
	EURO I - 91/542/EEC I	0,297	7,52	0,0029
	EURO II - 91/542/EEC II	0,155	7,91	0,0029
	EURO III - 2000	0,13	6,27	0,0029
	EURO IV - 2005	0,0239	3,83	0,0029
	EURO V - 2008	0,0239	2,18	0,011
	EURO VI	0,0012	0,422	0,009
<b>Diesel &gt;32 t</b>	Convencional	0,491	12,8	0,0029
	EURO I - 91/542/EEC I	0,358	9,04	0,0029
	EURO II - 91/542/EEC II	0,194	9,36	0,0029
	EURO III - 2000	0,151	7,43	0,0029
	EURO IV - 2005	0,0268	4,61	0,0029
	EURO V - 2008	0,0268	2,63	0,011
	EURO VI	0,0013	0,507	0,009

Fuente: elaboración propia, a partir 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).

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

**Tabla 17 – Resumen factores de emisión por defecto para buses<sup>3</sup>**

Tipo		MP2,5	NO <sub>x</sub>	NH <sub>3</sub>
Unidad	Tecnología	g/km	g/km	g/km
Nota		MP2,5 = MP10 = MPS	NO <sub>2</sub> equivalente	-
<b>Buses urbanos estándar</b>	Convencional	0,9090	16,500	0,0029
	EURO I - 91/542/EEC I	0,4790	10,100	0,0029
	EURO II - 91/542/EEC II	0,2200	10,700	0,0029
	EURO III - 2000	0,2070	9,380	0,0029
	EURO IV - 2005	0,0462	5,420	0,0029
	EURO V - 2008	0,0462	3,090	0,011
	EURO VI	0,0023	0,597	0,009
<b>Buses interurbanos estándar</b>	Convencional	0,4700	10,600	0,0029
	EURO I - 91/542/EEC I	0,3620	8,100	0,0029
	EURO II - 91/542/EEC II	0,1650	8,950	0,0029
	EURO III - 2000	0,1780	7,510	0,0029
	EURO IV - 2005	0,0354	4,510	0,0029
	EURO V - 2008	0,0354	2,570	0,011
	EURO VI	0,0018	0,496	0,009

Fuente: elaboración propia, a partir de la 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).

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

## 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, 2017).

- *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 la Guía, se consideran como valores por defecto los niveles de actividad obtenidos partir del *Manual para el desarrollo de inventarios de emisiones atmosféricas* (MMA, 2017). En la tabla 18 se presentan dichos valores:

**Tabla 18 – Resumen niveles de actividad por defecto para niveles de actividad fuentes móviles**

Tipo de Vehículo	RM (km/veh)
Camiones livianos	22.372
Camiones medianos	39.180
Camiones pesados	48.700
Buses	69.848

Fuente: elaboración propia, a partir la 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.

- El artículo 16 del DS N°31/2016 establece que a partir del año 2020 todos los vehículos que ingresen al parque vehicular de la Región Metropolitana deberán cumplir con normativa EURO VI y la norma EPA equivalente. Considerando lo anterior, si se utiliza el supuesto del recambio del vehículo chatarrizado por un tercero que ingrese un vehículo nuevo a la flota de la Región Metropolitana, se podrá utilizar para el cálculo el factor de emisión de vehículos con la norma de emisión establecida por el artículo referido.

## Plan de seguimiento

Además de los parámetros requeridos para el plan de seguimiento de un PCE presentados en el capítulo 5 de esta Guía, 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 19:

**Tabla 19 - Acreditación plan de seguimiento: Chatarrización de motores.**

Ítem	Forma de acreditación
Acreditación supuesto 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"><li>– 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.</li><li>– Inscripción de la transferencia de dominio del vehículo a nombre del titular del proyecto en el Registro Nacional de Vehículos Motorizados.</li><li>– Permiso de circulación del vehículo, de al menos el último año en la Región Metropolitana.</li><li>– Certificado de revisión técnica, de al menos el último año y vigente a la fecha de la compra del vehículo.</li></ul>
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"><li>– Certificado de Inscripción y Anotaciones Vigentes del Registro Nacional de Vehículos Motorizados, en que conste la cancelación de la inscripción por desarme del vehículo.</li><li>– 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).</li><li>– 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.</li></ul>

Fuente: elaboración propia.

## Ejemplo de cálculo aplicado

Un proyecto luego de obtener su RCA favorable debe compensar un total de 25,00  $\left(\frac{t}{año}\right)$  de óxidos de nitrógeno (NOx). 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 diésel convencionales sin norma de emisión<sup>4</sup>.

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 Región Metropolitana 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 estos 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 16, se consideran camiones con un peso entre 16 y 32 toneladas, siendo 10,7  $\frac{g\ NOx}{km}$  y 0,42  $\frac{g\ NOx}{km}$  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  $\left(\frac{km}{año}\right)$ , el que corresponde al valor por defecto presentado en la tabla 18 de esta Guía, 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:

$$\begin{aligned} \text{Emisión}_{\text{Caso Base}} &= FE_{\text{Base}} \cdot NA_{\text{Base}} \\ \text{Emisión}_{\text{Caso Base}} &= 10,70 \left(\frac{g\ NOx}{km}\right) \cdot 48.700 \left(\frac{km}{año}\right) \cdot \frac{1\ t}{10^6g} = 0,52 \left(\frac{t\ NOx}{año - equipo}\right) \end{aligned}$$

<sup>4</sup> 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.

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

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

$$\text{Emisión}_{\text{Con Mecanismo}} = 0,42 \left( \frac{\text{g NO}_x}{\text{km}} \right) \cdot 48.700 \left( \frac{\text{km}}{\text{año}} \right) \cdot \frac{1 \text{ t}}{10^6 \text{ g}} = 0,02 \left( \frac{\text{t NO}_x}{\text{año} - \text{equipo}} \right)$$

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

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

$$\text{Reducción unitaria} = 0,52 \left( \frac{\text{t NO}_x}{\text{año} - \text{camión}} \right) - 0,02 \left( \frac{\text{t NO}_x}{\text{año} - \text{camión}} \right) = 0,50 \left( \frac{\text{t NO}_x}{\text{año} - \text{camión}} \right)$$

En base al cálculo presentado, se establece que por cada camión chatarrizado se generará una reducción de 0,50 toneladas

de NO<sub>x</sub> al año. A continuación, se calcula la cantidad de camiones a chatarrizar:

$$\text{Camiones a chatarrizar} = \frac{\text{Toneladas a compensar}}{\text{Reducción unitaria}}$$

$$\text{Camiones a chatarrizar} = \frac{25,00 \left( \frac{\text{t NO}_x}{\text{año}} \right)}{0,50 \left( \frac{\text{t NO}_x}{\text{año} - \text{camión}} \right)}$$

$$\text{Camiones a chatarrizar} = 50 \text{ (camiones)}$$

A partir de los cálculos realizados, el proyecto deberá realizar la chatarrización de 50 camiones pesados diésel

convencional (sin norma de emisión) para así dar cumplimiento a las toneladas totales a compensar de acuerdo a su RCA.

## ANEXO 4 — MECANISMO DE COMPENSACIÓN: FILTROS PARA FUENTES FIJAS INDUSTRIALES Y/O COMERCIALES

### Descripción del mecanismo y justificación

El mecanismo consiste en instalar un filtro en las fuentes fijas industriales y/o comerciales con el fin de disminuir sus emisiones atmosféricas. Para este caso aplican fuentes como grupos electrógenos, hornos, calderas, entre otros.

En la tabla 20 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 20 – 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, 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.
Permanente	Se espera que el sistema de filtro 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

mecanismo de compensación presentado:

A continuación, en la tabla 21 se listan las principales ventajas y desventajas del

**Tabla 21 – 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>a) La aplicación se limita 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.</p> <p>b) Los costos en una aplicación de este tipo pueden ser muy elevados tanto para realizar mediciones como para implementar el mecanismo, dependiendo de la fuente en la que se aplique, lo que puede desmotivar a los titulares a elegir este mecanismo.</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 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 propietario de la fuente de emisión donde se implemente este mecanismo de compensación.

### 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” (ISPCH, 2012).

## Plan de seguimiento

Además de los parámetros requeridos para el plan de seguimiento de un PCE presentados en el capítulo 5 de esta Guía, si se determina realizar la compensación de

emisiones mediante la instalación de filtros para fuentes fijas comerciales o industriales, para dar cumplimiento al objetivo general de un plan de seguimiento, se deberá incluir lo que se presenta en la tabla 22:

**Tabla 22 - Acreditación plan de seguimiento: Filtros para fuentes fijas comerciales o industriales**

Ítem	Forma de acreditación
Acreditación supuesto de estado inicial de fuente a compensar	Descripción de la fuente fija donde se instalará el filtro, considerando número de registro, fotos referenciales, entre otros.
Acreditación de la ejecución del PCE	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. Además, el beneficiario se comprometerá a dar un correcto uso del filtro nuevo durante un tiempo mayor o igual a la vida útil del mismo.
Acreditación de la eficiencia del mecanismo	Con el fin de asegurar que la generación de emisiones atmosféricas de la fuente con el filtro instalado cumpla con una reducción igual o mayor a lo establecido en la resolución exenta que aprueba al PCE, se deberá incluir un certificado de la medición de las emisiones de la fuente una vez este el filtro instalado, la cual deberá realizarse en base a la resolución 15.027 de la Seremi de Salud, que “Establece procedimiento de declaración de emisiones para fuentes estacionarias que indica” (Seremi de Salud, 1994).

Fuente: elaboración propia.

## Ejemplo de cálculo aplicado

Un proyecto debe compensar sus emisiones de MP<sub>2,5</sub> equivalente por 3 toneladas, de las cuales 0,13 toneladas corresponden a combustión. Para compensar sus emisiones por combustión, el titular ha decidido incorporar un sistema de filtro en un grupo electrógeno a utilizar dentro de sus instalaciones.

Para estimar el factor de emisión, el titular ha realizado un muestreo isocinético de material particulado bajo el método CH-5, a partir del cual se midió una emisión  $0,11 \frac{\text{kg MP}}{\text{h}}$ . Luego, se realizó la misma medición incorporando el sistema de filtro a la fuente, obteniendo como resultado una emisión de  $0,01 \frac{\text{kg MP}}{\text{h}}$ .

Respecto a los niveles de actividad, la fuente se utiliza 4 horas al día durante todos los días del año, por lo que opera un total de 1.460 horas cada año.

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 operación del grupo electrógeno industrial sin filtro:

$$\begin{aligned} \text{Emisión}_{\text{Caso Base}} &= \text{FE}_{\text{Base}} \cdot \text{NA}_{\text{Base}} \\ \text{Emisión}_{\text{Caso Base}} &= 0,11 \left( \frac{\text{kg MP}}{\text{hr}} \right) \cdot 1.460 \left( \frac{\text{h}}{\text{año}} \right) \cdot \frac{1 \text{ t}}{10^3 \text{ kg}} = 0,16 \left( \frac{\text{t MP}}{\text{año} - \text{equipo}} \right) \end{aligned}$$

Luego, se presenta el cálculo para el caso con mecanismo, que considera la

operación del grupo electrógeno industrial con filtro:

$$\begin{aligned} \text{Emisión}_{\text{Con Mecanismo}} &= \text{FE}_{\text{Con Mecanismo}} \cdot \text{NA}_{\text{Con Mecanismo}} \\ \text{Emisión}_{\text{Con Mecanismo}} &= 0,01 \left( \frac{\text{kg MP}}{\text{hr}} \right) \cdot 1.460 \left( \frac{\text{h}}{\text{año}} \right) \cdot \frac{1 \text{ t}}{10^3 \text{ kg}} = 0,02 \left( \frac{\text{t MP}}{\text{año} - \text{equipo}} \right) \end{aligned}$$

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 las toneladas anuales compensadas:

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

$$\text{Reducción unitaria} = 0,16 \left( \frac{\text{t MP}}{\text{año}} \right) - 0,02 \left( \frac{\text{t MP}}{\text{año}} \right) = 0,14 \left( \frac{\text{t MP}}{\text{año}} \right)$$

A partir de los cálculos presentados, se tiene que la instalación del filtro en el grupo electrógeno de respaldo logra compensar 0,14 toneladas de material particulado

cada año, monto superior a las 0,13 toneladas que requiere compensar el proyecto en base a su RCA, cumpliendo así con las toneladas a compensar requeridas.

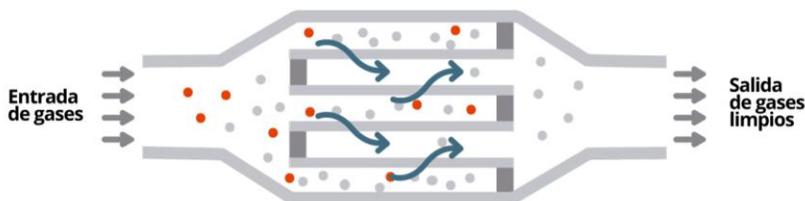
## ANEXO 5 — MECANISMO DE COMPENSACIÓN: FILTROS DPF PARA FUENTES MÓVILES

### Descripción del mecanismo y justificación

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, tal y como se muestra en la figura 5:

Figura 5 – Diagrama de funcionamiento de filtro DPF



Fuente: adaptado de Reşitoğlu, Altinişik, & Keskin (2015).

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  $\mu\text{m}$ . 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<sub>2</sub>) 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 NO<sub>2</sub> promueven la oxidación continua de las partículas de carbono.

De acuerdo a el punto 5.2.1 del documento *Contenido esencial bases de licitación concesión uso de vías 2018*, los buses que se integren al sistema de transporte público y que cuenten con motores de combustión interna tendrán que cumplir con la norma de emisión EURO VI o EPA 2010 y deberán contar con motores cuyas emisiones contaminantes no superen los niveles máximos de emisiones señalados por el DS N°31/2016.

Considerando lo anterior, el tipo de fuente móvil objetivo de este mecanismo corresponde a flotas de buses o camiones con norma de emisión antiguos pero que sigan vigentes en circulación y que no tengan que ser retirados de circulación obligatoriamente, por lo que 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 Región Metropolitana.

En la tabla 23 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 23 – 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).
Verificable	Se podrá verificar la efectiva reducción de emisiones con mediciones luego de instalar el filtro en la fuente.
Adicional	Si la ley 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: elaboración propia.

## Ventajas y desventajas

A continuación, en la tabla 24 se listan las principales ventajas y desventajas del

mecanismo de compensación presentado:

**Tabla 24 – 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: elaboración propia.

## Metodología de cálculo de compensación

### Factores de emisión

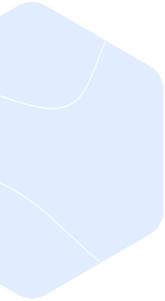
Los factores de emisión podrán ser referenciados bibliográficamente, o bien ser establecidos a partir de mediciones en las mismas fuentes móviles sobre las cuales se quiera implementar los filtros DPF.

Se podrán considerar como valores por defecto para los factores de emisión los

presentados en la tabla 16 y la tabla 17 de esta Guía.

### 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 18 de esta Guía.

### 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.

### Plan de seguimiento

Además de los parámetros requeridos para el plan de seguimiento de un PCE presentados en el capítulo 5 de esta Guía, 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 25:

**Tabla 25 - Acreditación plan de seguimiento: filtros DPF para fuentes móviles.**

Ítem	Forma de acreditación
Acreditación supuesto 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	<p>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).</p> <p>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.</p>

Fuente: elaboración propia.

## Ejemplo de cálculo aplicado

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 dentro de la Región Metropolitana.

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 17 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 en la Región Metropolitana por tipo de vehículo presentados en la tabla 18, 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 93%<sup>5</sup>. En base a la eficiencia presentada, se asume que al instalar el filtro DPF un bus emitirá un 93% menos de material particulado, es decir, su factor de emisión corresponderá a 0,020 g/km.

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:

---

<sup>5</sup> Link de descarga de tabla con el listado de sistemas de postratamiento de emisiones

certificados:  
<https://www.mtt.gob.cl/archivos/5601>

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

$$\text{Emisión}_{\text{Caso Base}} = 0,207 \left( \frac{\text{g MP}}{\text{km}} \right) \cdot 69.848 \left( \frac{\text{km}}{\text{año} - \text{bus}} \right) \cdot \frac{1 \text{ t}}{10^6 \text{g}} = 0,014 \left( \frac{\text{t MP}}{\text{año} - \text{bus}} \right)$$

Luego, se presenta el cálculo para el caso con mecanismo, que considera la

instalación del filtro DPF en el bus y su eficiencia:

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

$$\text{Emisión}_{\text{Con Mecanismo}} = 0,207 \left( \frac{\text{g MP}}{\text{km}} \right) \cdot 69.848 \left( \frac{\text{km}}{\text{año} - \text{bus}} \right) \cdot \frac{1 \text{ t}}{10^6 \text{g}} \cdot (1 - 0,93)$$

$$\text{Emisión}_{\text{Con Mecanismo}} = 0,001 \left( \frac{\text{t MP}}{\text{año} - \text{bus}} \right)$$

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:

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

$$\text{Reducción unitaria} = 0,014 \left( \frac{\text{t MP}}{\text{año} - \text{bus}} \right) - 0,001 \left( \frac{\text{t MP}}{\text{año} - \text{bus}} \right) = 0,013 \left( \frac{\text{t MP}}{\text{año} - \text{bus}} \right)$$

$$\text{Filtros DPF a instalar} = \frac{\text{Toneladas a compensar}}{\text{Reducción unitaria}}$$

$$\text{Filtros DPF a instalar} = \frac{2,0 \left( \frac{\text{t MP}}{\text{año}} \right)}{0,013 \left( \frac{\text{t MP}}{\text{año} - \text{bus}} \right)}$$

$$\text{Filtros DPF a instalar} = 153,8 \text{ (filtros)} \sim 154 \text{ (filtros)}$$

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 Región Metropolitana, para así dar cumplimiento a las toneladas totales a compensar de acuerdo a su RCA.

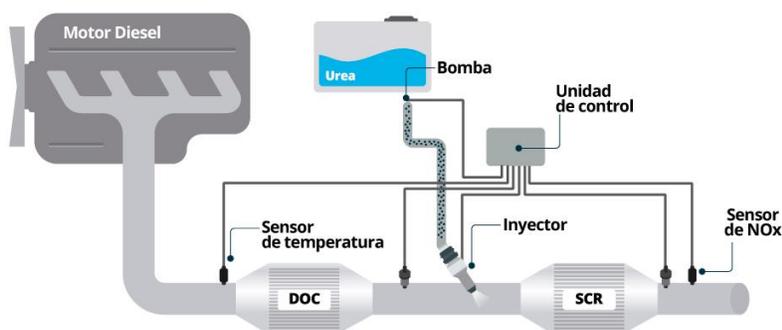
## ANEXO 6 — MECANISMO DE COMPENSACIÓN: IMPLEMENTACIÓN O REGENERACIÓN DE SISTEMA SCR PARA FUENTES MÓVILES

### Descripción del mecanismo y justificación

El mecanismo consiste en mejorar la eficiencia del sistema SCR (*Selective Catalytic Reduction*) para reducir las emisiones de óxidos de nitrógeno en fuentes móviles tales como buses o camiones y en maquinaria fuera de ruta.

La tecnología SCR se utiliza para minimizar las emisiones de NO<sub>x</sub> de los gases de escape de combustión de los motores y se aplica principalmente en vehículos pesados. Para disminuir las emisiones de óxidos de nitrógeno, el sistema utiliza como reductor una solución acuosa de urea. En la figura 6 se muestra un esquema del funcionamiento de un sistema SCR:

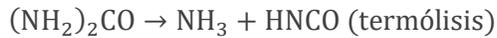
Figura 6 – Diagrama de funcionamiento de sistema SCR



Fuente: adaptado de Reşitoğlu, Altinişik, & Keskin (2015).

Considerando la toxicidad del amoníaco y para evitar la quema del mismo previo a la reacción que requiere el sistema, se suministra el reductor en una solución de urea (NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>CO y agua, en un 33% y un 67% en peso respectivamente (Reşitoğlu, Altinişik, & Keskin, 2015).

Para asegurar la eficiencia del sistema, se debe controlar de la mejor manera la cantidad de amoníaco (NH<sub>3</sub>) en el catalizador del SCR. Para esto se incorpora un inyector previo al sistema que suministra la solución de urea al flujo de gas. Como resultado de la vaporización del agua de la solución, las partículas sólidas de urea se comienzan a derretir en una reacción de termólisis:



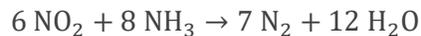
Como producto de esta reacción se forma amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) y ácido isocianico ( $\text{HNCO}$ ). El primero se utiliza como insumo para reducir los óxidos de nitrógeno en el

catalizador SCR y el segundo reacciona con agua en una hidrólisis, a partir de la cual se produce más amoníaco:



Terminadas las reacciones de termólisis e hidrólisis presentadas, se lleva a cabo la reducción de óxidos de nitrógeno en el SCR

con el amoníaco, tal y como se muestra a continuación en las siguientes reacciones:



De las ecuaciones anteriores, se aprecia que los productos de las reacciones corresponden a nitrógeno ( $\text{N}_2$ ) y agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ) los que son liberados a la atmósfera una vez terminado el proceso.

Si bien el abatimiento de emisiones de  $\text{NO}_x$  se cumple en condiciones ideales de operación del sistema, una variable limitante corresponde a la temperatura, debido a que las reacciones requeridas por el sistema se producen a partir de una temperatura de  $200^\circ\text{C}$  y alcanzan su óptimo de conversión a los  $350^\circ\text{C}$  (Way et al., 2009). A temperaturas inferiores a los  $200^\circ\text{C}$  se generan problemas en el sistema, tales como la generación de ácido cianhídrico, biurea, melaminas y otros productos indeseados que se pueden acumular en el sistema de inyección y en el tubo de escape.

En términos promedio, la velocidad de un bus ronda los 20-25 km/h. A bajas velocidades es difícil que este alcance la temperatura óptima de operación del sistema de SCR con solución de urea como reactivo, sobre todo en épocas de frío. Debido a lo anterior, el sistema SCR no funciona de manera óptima en vehículos del transporte público y funcionan mejor en vehículos que circulan en autopistas y rutas rurales. Así, los buses del transporte público pueden generar en la práctica emisiones que pueden ser mayores a las testeadas en laboratorio.

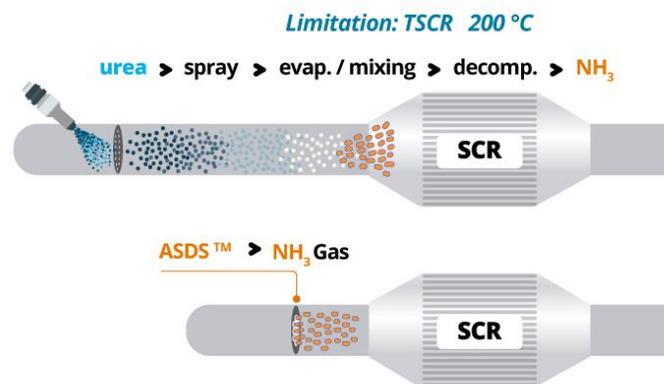
Considerando lo anterior, bajo el desarrollo e investigación en el área, se han desarrollado nuevas tecnologías que permiten regenerar el sistema SCR utilizando para ello un agente reductor, que

corresponde básicamente a amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) en estado sólido que se dosifica directamente sobre el flujo de gases de salida, permitiendo la catalización y conversión de  $\text{NO}_x$  incluso a bajas temperaturas, quitando la limitante de necesitar una temperatura determinada para el funcionamiento del sistema. Otra ventaja específica es que no genera productos indeseados que puedan tapar el

sistema y provocar fallas en el mismo, como sí ocurre cuando se utiliza la solución de urea como reactivo.

La figura 7 muestra un diagrama de ejemplo para visualizar las diferencias entre utilizar un sistema SCR con urea en solución y en estado sólido:

**Figura 7 – Diagrama ejemplo SCR con urea en solución y en estado sólido**

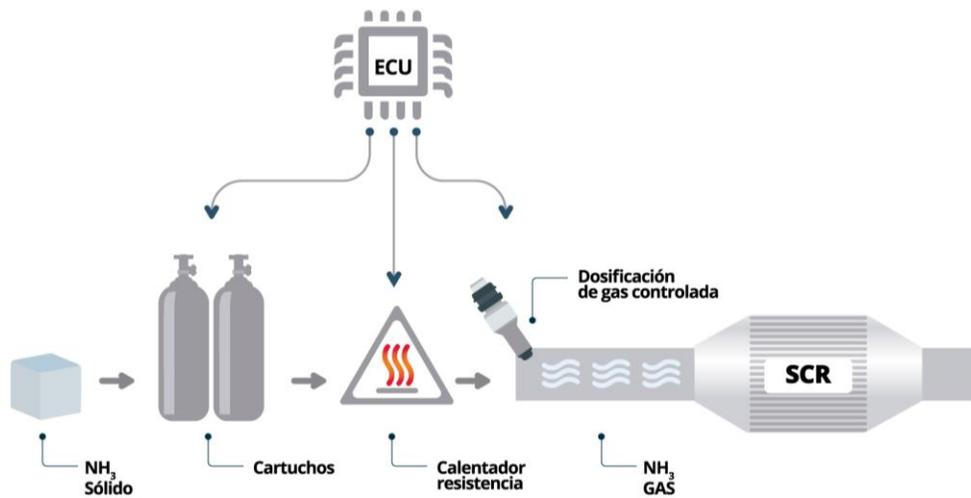


Fuente: adaptado de Johannessen (2018).

Por otro lado, en la figura 8 se muestran los insumos requeridos para la instalación de un sistema de este tipo que permita

regenerar el sistema SCR para abatimiento de  $\text{NO}_x$  en un vehículo:

**Figura 8 – Diagrama ejemplo de insumos de instalación de regeneración de sistema SCR**



Fuente: imagen elaborada a partir de información proporcionada por Purexhaust S.A.

En la tabla 26 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 26 – Resumen cumplimiento de criterios mecanismo de compensación: implementación o regeneración de sistema SCR para fuentes móviles**

Criterio	Detalle
Medible	Es factible realizar mediciones directamente en la fuente donde se implemente el sistema SCR, específicamente en el Centro de Control y Certificación Vehicular (3CV).
Verificable	Se podrá verificar la efectiva reducción de emisiones con mediciones luego de instalar el sistema en la fuente.
Adicional	Si la ley no establece que la fuente móvil sobre la cual se aplicará el sistema que debe tenerlo, se considera un mecanismo de compensación adicional.
Permanente	Siempre y cuando se realice buena mantención y uso del sistema, este puede tener una larga vida útil que se puede extender por un período mayor al que un proyecto deba compensar emisiones.

Fuente: elaboración propia.

## Ventajas y desventajas

mecanismo de compensación presentado:

A continuación, en la tabla 27 se listan las principales ventajas y desventajas del

**Tabla 27 – Ventajas y desventajas mecanismo de compensación: regeneración de sistema SCR para fuentes móviles**

Ventajas	Desventajas
<p>a) Si bien los vehículos modernos (EURO V o VI) tienen incorporado un sistema SCR, las emisiones reales en su operación distan mucho de las mediciones en laboratorio, principalmente por las condiciones de operación de los vehículos. Este mecanismo permite alcanzar bajas emisiones considerando la operación real de buses y camiones.</p> <p>b) A medida que se vaya renovando la flota vehicular en la RM, habrán cada vez más buses y camiones modernos, por lo que este mecanismo tiene amplia aplicabilidad a futuro, cuando sean estas las principales fuentes a considerar para compensar emisiones.</p> <p>c) El sistema puede contar con una aplicación que muestra en tiempo real las emisiones, lo que facilita el seguimiento y fiscalización del mecanismo.</p>	<p>a) Para que su implementación sea efectiva, se deberán realizar mediciones reales de la fuente donde se instalará el sistema para cuantificar la emisión potencial real a reducir.</p> <p>b) Este mecanismo se puede aplicar en fuentes móviles que tengan sistema SCR incorporado, lo que limita su aplicación. También se puede incorporar el sistema desde cero en un vehículo, pero la complejidad en la implementación es alta y el costo es muy elevado.</p> <p>c) La eficiencia del mecanismo de compensación se limita a la correcta mantención del sistema, factor que dependerá de la correcta ejecución del mecanismo por parte del titular.</p> <p>d) El aditivo a utilizar para su funcionamiento no se comercializa en forma masiva actualmente en Chile, El aditivo a utilizar para su funcionamiento no se comercializa en forma masiva actualmente en Chile.</p>

Fuente: elaboración propia.

## Metodología de cálculo de compensación

### Factores de emisión

Para los factores de emisión a utilizar en este mecanismo, lo ideal corresponde a realizar mediciones directamente en la fuente donde se va a implementar la regeneración del sistema SCR. Lo anterior,

debido a que si se consideran valores referenciales, lo más probable es que el factor de emisión de NO<sub>x</sub> para un vehículo EURO VI o EURO V sea un valor testado en laboratorio y no en condiciones reales de operación, lo que se traducirá en un factor de baja magnitud para el caso base, que

hará que el número de vehículos que haya que reconvertir se eleve.

Además, al realizar mediciones directamente en la fuente donde se implementará el mecanismo se está teniendo un valor real de emisión, lo que refleja de mejor medida las emisiones que se dejarán de generar por realizar la regeneración del sistema SCR.

### **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 la regeneración de sistema SCR en una flota de buses, habrá que

determinar o estimar la cantidad de kilómetros al año que recorren.

Para efectos de la estimación, se podrán considerar como valores por defecto aquellos presentados en la tabla 18 de esta Guía.

### **Consideraciones importantes**

- El vehículo donde se quiera realizar la regeneración del sistema SCR deberá tener implementado este sistema desde antes, y la implementación consiste simplemente en cambiar el tipo de aditivo y la forma en la que este se suministra al flujo de gases de salida del motor.

## Plan de seguimiento

Además de los parámetros requeridos para el plan de seguimiento de un PCE presentados en el capítulo 5 de esta Guía, si se determina realizar la compensación de

emisiones mediante la regeneración de sistema SCR en fuentes móviles, para dar cumplimiento al objetivo general de un plan de seguimiento, se deberá incluir lo que se presenta en la tabla 28:

**Tabla 28 - Acreditación plan de seguimiento. Regeneración sistema SCR para fuentes móviles**

Ítem	Forma de acreditación
Acreditación supuesto de estado inicial de fuente a compensar	Listado de vehículos donde se realizará la regeneración del sistema SCR y su vigencia, es decir, verificar que las características del vehículo 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 sistema instalado sea capaz de cumplir su función, se deberá incluir el certificado de fábrica del mismo.  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 regeneración del sistema y la asistencia a una charla informativa que dé cuenta del motivo del PCE y de la capacitación respecto al uso del sistema nuevo. Además, el beneficiario se comprometerá a dar un correcto uso del sistema nuevo durante un tiempo mayor o igual al período a compensar por parte del proyecto.

Fuente: elaboración propia.

## Ejemplo de cálculo aplicado

Un proyecto debe compensar sus emisiones de óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) por un monto total de 12 t/año para el primer año de su fase de construcción.

Para los factores de emisión, se ha considerado la presentación del estudio *Direct ammonia SCR: the optimal solution for real driving emissions* (Johannessen, 2015), para la cual se establece que a partir de mediciones hechas en un bus con sistema SCR que utiliza una solución de urea como reactivo, se genera una emisión aproximada de  $7,69 \frac{\text{g NO}_x}{\text{km}}$ . Por otro lado, al considerar el mismo bus utilizando regeneración de sistema SCR con otro tipo

de reactivo, se genera una emisión aproximada de  $1,69 \frac{\text{g NO}_x}{\text{km}}$ .

Para el nivel de actividad, se consideran los valores por defecto presentados en la Tabla 18 de esta Guía, 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.

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 emisiones reales medidas en fuente de un bus con sistema SCR:

$$\begin{aligned} \text{Emisión}_{\text{Caso Base}} &= \text{FE}_{\text{Base}} \cdot \text{NA}_{\text{Base}} \\ \text{Emisión}_{\text{Caso Base}} &= 7,69 \left( \frac{\text{g NO}_x}{\text{km}} \right) \cdot 69.848 \left( \frac{\text{km}}{\text{año}} \right) \cdot \frac{1 \text{ t}}{10^6 \text{ g}} = 0,54 \left( \frac{\text{t NO}_x}{\text{año} - \text{equipo}} \right) \end{aligned}$$

Luego, se presenta el cálculo para el caso con mecanismo, que considera la regeneración del sistema SCR en el bus:

$$\begin{aligned} \text{Emisión}_{\text{Con Mecanismo}} &= \text{FE}_{\text{Con Mecanismo}} \cdot \text{NA}_{\text{Con Mecanismo}} \\ \text{Emisión}_{\text{Con Mecanismo}} &= 1,69 \left( \frac{\text{g NO}_x}{\text{km}} \right) \cdot 69.848 \left( \frac{\text{km}}{\text{año}} \right) \cdot \frac{1 \text{ t}}{10^6 \text{ g}} = 0,12 \left( \frac{\text{t NO}_x}{\text{año} - \text{equipo}} \right) \end{aligned}$$

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 buses a los que se

les deberá regenerar el sistema SCR cambiar para cumplir con las toneladas totales de contaminante a compensar:

Reducción unitaria = Emisión caso base – Emisión con mecanismo

$$\text{Reducción unitaria} = 0,54 \left( \frac{\text{t NO}_x}{\text{año} - \text{bus}} \right) - 0,12 \left( \frac{\text{t NO}_x}{\text{año} - \text{bus}} \right) = 0,42 \left( \frac{\text{t NO}_x}{\text{año} - \text{bus}} \right)$$

A partir de los cálculos realizados, se aprecia que para cada bus al que se le realice una regeneración de su sistema SCR,

compensará 0,53 toneladas de NOx por año.

$$\text{Buses a reconvertir} = \frac{\text{Toneladas a compensar}}{\text{Reducción unitaria}}$$

$$\text{Buses a reconvertir} = \frac{12,0 \left( \frac{\text{t NO}_x}{\text{año}} \right)}{0,42 \left( \frac{\text{t NO}_x}{\text{año} - \text{bus}} \right)}$$

$$\text{Buses a reconvertir} = 28,57 \text{ (buses)} \sim 29 \text{ (buses)}$$

De acuerdo a los cálculos presentados, el titular del proyecto deberá realizar la regeneración del sistema SCR en un total de

29 buses para cumplir con la compensación requerida por su RCA.

## ANEXO 7 — MECANISMO DE COMPENSACIÓN: RECAMBIO O MEJORAS TECNOLÓGICAS PARA CALDERAS

### Descripción del mecanismo y justificación

Este mecanismo consiste en realizar recambio o mejoras tecnológicas a calderas, tanto para calderas utilizadas para calefacción como para industriales. Este mecanismo consiste en realizar recambio o mejoras tecnológicas a calderas, tanto para calderas utilizadas para calefacción como para industriales.

La mejora tecnológica a implementar en una caldera dependerá de diversos factores, tales como el tipo de combustible utilizado, el tipo de caldera y el objetivo global de la mejora tecnológica. El resultado de la implementación de este mecanismo se traduce en mejorar su eficiencia energética y a la vez reducir las emisiones de contaminantes atmosféricos.

Algunas de las mejoras tecnológicas a aplicar en calderas son las siguientes:

- Quemadores de premezcla.
- Quemadores con control de O<sub>2</sub> y CO.
- Quemadores de bajo NO<sub>x</sub>.
- Sistema de reducción catalítica no selectiva.
- Sistema de reducción catalítica selectiva.
- Precipitador electrostático.
- Filtro de mangas.

- *Scrubber* húmedo.
- Desulfurización de gas seca.
- Desulfurización de gas húmeda.

Las mejoras tecnológicas pueden ser aplicadas en forma separada o conjunta, dependiendo del tipo de caldera y del combustible que utilice.

En base a información bibliográfica, se presenta a continuación el funcionamiento de los quemadores para calderas y sus principal justificación para ser considerados como mecanismo de compensación (AIChE, 2013).

La forma en como los diseños de los quemadores reducen las emisiones tiene un impacto significativo en la forma de la llama y su comportamiento.

Por lo general, el objetivo de los quemadores modernos utilizados para reducir las emisiones de calderas corresponde a retrasar la combustión por medio del control del aire y el combustible utilizado en múltiples zonas dentro del sistema. De esta forma, se varía la mezcla aire-combustible, lo que ralentiza el proceso de combustión y con ello las temperaturas altas de la llama que promueven la producción de NO<sub>x</sub>. En este tipo de quemadores, el aire primario (aproximadamente el 40% del aire total) se mezcla con la cantidad total de combustible

disponible, produciendo una llama rica en combustible. Esta zona primaria de la llama está relativamente fría y al mismo tiempo tiene bajo nivel de oxígeno disponible, condiciones que inhiben la formación de NO<sub>x</sub>. Luego, se introduce aire secundario aguas abajo de la zona de la llama primaria para, de esta forma, completar la combustión en un ambiente lo suficientemente frío para limitar la producción de NO<sub>x</sub>.

Un efecto similar se consigue en los quemadores de combustible por etapas, en donde se separa el combustible en dos etapas mientras que todo el aire se introduce a la llama de una sola vez.

En la tabla 29 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 29 – Resumen cumplimiento de criterios mecanismo de compensación: mejoras tecnológicas para calderas**

criterio	Detalle
Medible	Es posible realizar mediciones de emisiones directamente en la fuente.
Verificable	Para verificar la reducción de emisiones, se pueden realizar mediciones antes y después de implementar un recambio o una mejora tecnológica en la caldera.
Adicional	Si la ley no exige reducir las emisiones del tipo de caldera seleccionado, el propietario no está en la obligación de implementar mejoras tecnológicas en la caldera, por lo que el mecanismo se considera adicional.
Permanente	Se asume que un recambio o alguna mejora tecnológica implementada en la caldera queden de forma permanente, por lo que se asume que reducirán emisiones por un tiempo superior al que un proyecto deba compensar emisiones.

Fuente: elaboración propia.

## Ventajas y desventajas

mecanismo de compensación presentado:

A continuación, en la tabla 30 se listan las principales ventajas y desventajas del

**Tabla 30 – Ventajas y desventajas mecanismo de compensación: mejoras tecnológicas para calderas domiciliarias e industriales**

Ventajas	Desventajas
a) Aplicable en calderas residenciales, de instituciones públicas (hospitales, jardines infantiles, colegios, universidades, municipalidades, etc.) e industriales. b) Además de reducir emisiones atmosféricas, se logran mejoras de eficiencia energética.	a) La implementación de la tecnología dependerá de manera particular para cada tipo de caldera, lo que dificulta su replicabilidad en el caso de que se tenga que implementar en más de una fuente.

Fuente: elaboración propia.

## Metodología de cálculo de compensación

### Factores de emisión

Para poder estimar las emisiones que son reducidas por la instalación de quemadores de bajo NO<sub>x</sub>, se podrá utilizar el factor de emisión establecido en el capítulo 1.4 de la AP-42 de la EPA (*Natural Gas Combustion*).

A continuación, se presentan en la tabla 31 a modo de valores por defecto, los factores de emisión de los contaminantes de interés para compensación para calderas obtenidos de la tabla 2-2 del *Manual para el desarrollo de inventarios de emisiones atmosféricas* (MMA, 2017):

**Tabla 31 – Resumen valores por defecto factores de emisión calderas (kg/kg comb).6**

Combustible	MP2,5	MP10	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>
Gas natural, P > 29,31 MW	0,0001604	0,0001604	0,005909	0,0000126
Gas natural, P < 29,31 MW	0,0001604	0,0001604	0,00211	0,0000126
Petróleo N°6, P > 29,31 MW	0,001165*S+0,0004083	0,001165*S+0,0004083	0,00596	0,02*S
Petróleo N°6, P < 29,31 MW	0,001165*S+0,0004083	0,001165*S+0,0004083	0,006974	0,02*S
Petróleo N°5, P > 29,31 MW	0,001188*S+0,0004162	0,001188*S+0,0004162	0,0060753	0,02029*S

<sup>6</sup> S: contenido de azufre del combustible (%\*100).

Combustible	MP2,5	MP10	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>
Petróleo N°5, P < 29,31 MW	0,001188*S+0,0,0004162	0,001188*S+0,0,0004162	0,0071094	0,02029*S
Diésel	0,0002853	0,0002853	0,003424	0,02026*S
Kerosene <sup>7</sup>	0,000036*S	0,00015	0,00148	0,02101
Carbón	0,00217724	0,0083461	0,009979	0,01724*S
Leña	0,001950187	0,00226473	0,003083	0,0001573
GLP butano	0,0001743	0,0001743	0,003268	0,000020*S
GLP propano	0,0001525	0,0001525	0,002832	0,000022*S

Fuente: elaboración propia, a partir de la tabla 2-2 del *Manual para el desarrollo de inventarios de emisiones atmosféricas* (MMA, 2019).

### Niveles de actividad

Los niveles de actividad se deberán obtener directamente de información proporcionada del propietario de la caldera, que deberá indicar el registro de consumo de combustible.

deberá considerar la eficiencia de remoción aplicable, la que normalmente es proporcionada por el fabricante. Para efectos de esta Guía, se podrán considerar las siguientes eficiencias de remoción como valores por defecto dependiendo de la tecnología a aplicar, presentadas en la tabla 32:

Por otro lado, dependiendo de la mejora tecnológica a aplicar en la caldera se

**Tabla 32 – Valores por defecto eficiencias de remoción de tecnologías en calderas.**

Equipo de control	Contaminante	Eficiencia típica
LNB ( <i>low NOx burner</i> )	NO <sub>x</sub>	47,5%
SNCR	NO <sub>x</sub>	45%
SCR	NO <sub>x</sub>	80%
LNB+SCR	NO <sub>x</sub>	91%
LNB+SNCR	NO <sub>x</sub>	69,50%
ESP ( <i>electrostatic precipitator</i> )	MP10	98%
ESP ( <i>electrostatic precipitator</i> )	MP2,5	95%
Filtro de mangas	MP10	99%
Filtro de mangas	MP2,5	99%
<i>Wet scrubber</i>	SO <sub>2</sub>	95%
FGD seco ( <i>flue gas desulfurization</i> )	SO <sub>2</sub>	90%

<sup>7</sup> Para el MP se considera el MP filtrable, de tamaño superior a 0,3 µm, se asume MP = MP10 = MP2,5

Equipo de control	Contaminante	Eficiencia típica
FGD húmedo	SO <sub>2</sub>	90%
Combustible bajo en S	SO <sub>2</sub>	75%

Fuente: elaboración propia, a partir de la tabla 2-4 del *Manual para el desarrollo de inventarios de emisiones atmosféricas* (MMA, 2017).

Es importante mencionar que, de ser utilizados los porcentajes de abatimiento presentados en la tabla anterior, una vez instalado el sistema se deberá acreditar la eficiencia por medio de mediciones.

tados en el capítulo 5 de esta Guía, si se determina realizar la compensación de emisiones mediante el recambio o mejoras tecnológicas para calderas, para dar cumplimiento al objetivo general de un plan de seguimiento, se deberá incluir lo que se presenta en la tabla 33:

### Plan de seguimiento

Además de los parámetros requeridos para el plan de seguimiento de un PCE presen-

**Tabla 33 - Acreditación plan de seguimiento: recambio o mejoras tecnológicas para calderas**

Ítem	Forma de acreditación
Acreditación supuesto de estado inicial de fuente a compensar	Listado de la/las caldera/s que se va/n a recambiar o a mejorar tecnológicamente, que incluya número de serie, tipo de caldera, fotos referenciales, entre otros.
Acreditación de la ejecución del PCE	Certificado firmado del recambio o mejora tecnológica de la caldera por el proveedor y el beneficiario (que incluya capacitación de uso, motivos del PCE y recepción conforme, entre otros).
Acreditación de la eficiencia del mecanismo	Certificado de medición de emisiones con el recambio o mejora tecnológica de la caldera en base a la resolución 15.027 de la Seremi de Salud y que cumpla con lo establecido en el PPDA de la RM.

Fuente: elaboración propia.

## Ejemplo de cálculo aplicado

Para el ejemplo de este mecanismo de compensación de emisiones, se considera la mejora tecnológica en una caldera ignotubular que opera en un hospital.

Para el factor de emisión, se consideró el capítulo 1.4 del AP-42 de la EPA y el nivel de actividad (consumo de combustible anual) se obtuvo a partir de información

proporcionada por el hospital. Por otro lado, la eficiencia acreditada por el proveedor de la tecnología a implementar en la caldera es de un 60% de capacidad de control de emisiones de NO<sub>x</sub>.

A partir de los factores de emisión y niveles de actividad, se muestra a continuación el cálculo para el caso base, que considera la emisión de la caldera antes de incorporar la mejora tecnológica:

$$\begin{aligned} \text{Emisión}_{\text{Caso Base}} &= FE_{\text{Base}} \cdot NA_{\text{Base}} \\ \text{Emisión}_{\text{Con Mecanismo}} &= 0,002256 \left( \frac{\text{kg NO}_x}{\text{kg combustible}} \right) \cdot 771.456 \left( \frac{\text{kg combustible}}{\text{año}} \right) \cdot \frac{1 \text{ t}}{10^3 \text{ kg}} \\ \text{Emisión}_{\text{Caso Base}} &= 1,74 \left( \frac{\text{t NO}_x}{\text{año}} \right) \end{aligned}$$

Luego, se presenta el cálculo para el caso con mecanismo, que considera la

implementación de mejora tecnológica en la caldera:

$$\begin{aligned} \text{Emisión}_{\text{Con Mecanismo}} &= FE_{\text{Con Mecanismo}} \cdot NA_{\text{Con Mecanismo}} \\ \text{Emisión}_{\text{Con Mecanismo}} &= 0,002256 \left( \frac{\text{kg NO}_x}{\text{kg combustible}} \right) \cdot 771.456 \left( \frac{\text{kg combustible}}{\text{año}} \right) \cdot \frac{1 \text{ t}}{10^3 \text{ kg}} \cdot (1 - 0,6) \\ \text{Emisión}_{\text{Con Mecanismo}} &= 0,70 \left( \frac{\text{t NO}_x}{\text{año}} \right) \end{aligned}$$

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

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

$$\text{Reducción unitaria} = 1,74 \left( \frac{\text{t NO}_x}{\text{año}} \right) - 0,70 \left( \frac{\text{t NO}_x}{\text{año}} \right) = 1,04 \left( \frac{\text{t NO}_x}{\text{año}} \right)$$

Del cálculo presentado, se aprecia que al implementar la mejora tecnológica en la caldera ignotubular del hospital, se espera

una reducción de emisiones de NO<sub>x</sub> de 1,04 toneladas anuales.

## ANEXO 8 — MECANISMO DE COMPENSACIÓN: TECHOS Y/O MUROS VERDES

### Descripción del mecanismo y justificación

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 Región Metropolitana.

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 la 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 esta Guía 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 13 y la figura 14 de esta Guía.

Además de los beneficios en términos de calidad del aire presentados, este

tipo de mecanismo tiene una serie de otros beneficios a destacar, los que se resumen en el diagrama presentado en la Figura 9:

**Figura 9 – Diagrama dimensiones beneficiadas y servicios ecosistémicos asociados a azoteas vivas, verdes y activas**



Fuente: adaptado de Muñoz & Barros (2019).

En el aspecto legal, el capítulo IX: “Control del levantamiento de polvo y generación de áreas verdes” del *Plan de prevención y descontaminación atmosférica para la Región Metropolitana de Santiago* (MMA,

2016), en su artículo 99 establece que con el fin de contribuir a la reducción de la contaminación atmosférica en la Región Metropolitana, el Gobierno Regional Metropolitano continuará con la meta de



aumentar la dotación de áreas verdes, la construcción de parques y masas de vegetación que rodean la cuenca de Santiago, en 100 nuevas hectáreas. Además, el artículo 100 del referido plan establece que la Seremi del Medio Ambiente apoyará el aumento de áreas verdes mediante la exigencia de compensación de emisiones por emisiones de material particulado, mediante la mantención y generación de áreas verdes y masas de vegetación. Considerando lo anterior, el mecanismo de instalación de techos verdes va en directa relación con lo establecido en el PPDA de la Región Metropolitana.

En otro aspecto legal importante, se debe considerar 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), que 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 dentro de la Región Metropolitana.

A modo de ejemplo se presentan, en la Figura 10 y la Figura 11, las instalaciones de techos verdes en distintas aplicaciones realizadas internacionalmente. La primera consiste en el techo vegetal del Centro Juvenil Gary Corner en Chicago, Estados Unidos. Se trata de un jardín que sirve de espacio de aprendizaje y actividades para jóvenes y adultos mayores después del horario escolar, generando instancias para fomentar el aprendizaje en temas de horticultura y conciencia medioambiental en un barrio con limitado acceso a zonas verdes al aire libre. Por su parte, la segunda imagen corresponde al techo verde del Centro de Convenciones Javits en Nueva York, Estados Unidos, para el cual se estima que ha retenido el 77% del agua de lluvia, disminuyendo el flujo que va a las alcantarillas y evitando que estas colapsen:

Figura 10 – Ejemplo de implementación de techo verde, Centro Juvenil Gary Comer, Chicago, EE. UU.



Fuente: imagen referencial (Muñoz & Barros, 2019).

Figura 11 – Ejemplo de implementación de techo verde, Centro de Convenciones Javits, Nueva York, EE. UU.



Fuente: imagen referencial (Muñoz & Barros, 2019).

A modo de ejemplificar su uso en el ámbito nacional, en la Figura 12 se muestra un ejemplo de implementación

de techo verde en un edificio en la comuna de Ñuñoa:

Figura 12 – Ejemplo de implementación de techo verde en Edificio Amapolas en Ñuñoa, Región Metropolitana



Fuente: imagen referencial (Muñoz & Barros, 2019).

Por último, en cuanto a la disponibilidad de sitios donde se pueda aplicar este mecanismo de compensación, se estima que dentro de la Región Metropolitana, en la ciudad de Santiago, hay más de 1.000 hectáreas de techos susceptibles a ser convertidos en azoteas vivas (Muñoz & Barros, 2019). Este aspecto se considera importante, ya que en esta región existen amplias posibilidades de aplicar el mecanismo mencionado como alternativa de compensación de emisiones. 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 34 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 34 – 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 a terreno con fotos, visitas a terreno u otras actividades.
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: elaboración propia.

## Ventajas y desventajas

A continuación, en la tabla 35 se listan las principales ventajas y desventajas

del mecanismo de compensación presentado:

**Tabla 35 – 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) Si bien el mecanismo tiene una serie de ventajas cuantificables y no cuantificables, existe el desafío de aterrizar dichas ventajas a los titulares para que comprendan que los beneficios de implementar esta medida son costo/efectivos de una manera clara y precisa, lo que puede dificultar la implementación del mecanismo.</p> <p>d) Los costos asociados a la implementación de este mecanismo se justifican 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: elaboración propia.

## Metodología de cálculo de compensación

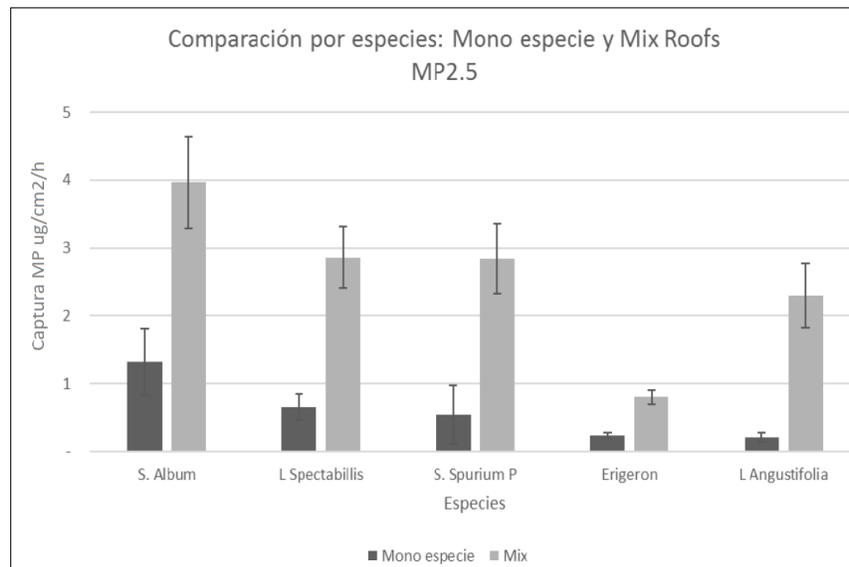
### Factores de emisión

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 esta Guía, se considerarán como valores por defecto los resultados del proyecto de investigación FONDEF ID15110104 “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.

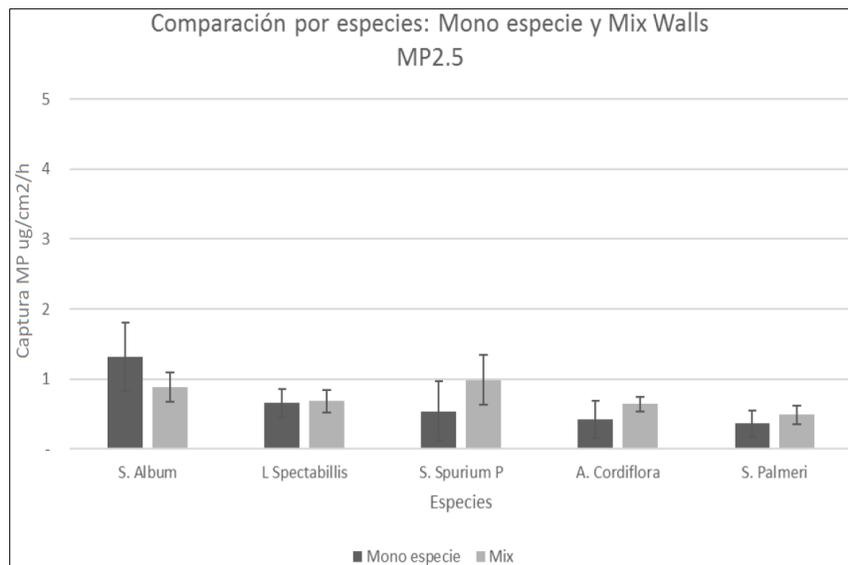
(2018) y la solicitud de patente N°201803445 (Vera et al., 2018). En la investigación mencionada, se estudiaron seis especies vegetales para techos verdes (*Sedum álbum*, *L. spectabilis*, *Sedum spurium*, *Erigeron sp.* y *Lavandula angustifolia*) y seis para muros verdes (*Sedum álbum*, *L. spectabilis*, *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 13 y la figura 14 se presentan la capacidad de captura de material particulado fino (MP2,5) para techos verdes y para muros verdes, respectivamente:

**Figura 13 – 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 ID15110104, Vera et al., 2018)

**Figura 14 – 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 ID15110104, Vera et al., 2018)

### Niveles de actividad

El nivel de actividad para este tipo de mecanismo deberá ser calculado directamente a partir de las emisiones totales a compensar por el proyecto y el factor de emisión utilizado para el cálculo. 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 esta Guía, se deberá demostrar la capacidad de remoción de contaminantes atmosféricos de las especies a implementar.

## Plan de seguimiento

Además de los parámetros requeridos para el plan de seguimiento de un PCE presentados en el capítulo 5 de esta Guía, 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 tabla 36:

**Tabla 36 - Acreditación plan de seguimiento: techos verdes**

Ítem	Forma de acreditación
Acreditación supuesto 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	<p>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.</p> <p>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).</p> <p>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.</p>

Fuente: 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 1 t/año de material particulado fino (MP2,5), 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 MP2,5 se utilizan los resultados presentados en la figura 13, a partir de la cual se estima una tasa de captura de  $4 \left( \frac{\mu\text{g}}{\text{cm}^2\text{h}} \right)$ . De esta forma, se convierten las unidades para estimar las toneladas de contaminante capturadas por año por cada m<sup>2</sup> de techo verde instalado con la configuración referida, tal y como se muestra a continuación:

$$\text{Captura } S. \text{ álbum en mix} = 4 \frac{\mu\text{g}}{\text{cm}^2\text{h}} \cdot \frac{8.760\text{h}}{\text{año}} \cdot \frac{(100\text{cm})^2}{1\text{m}^2} \cdot \frac{1\text{g}}{10^6\mu\text{g}} \cdot \frac{1\text{t}}{10^6\text{g}} = 3,50 \cdot 10^{-4} \frac{\text{t}}{\text{m}^2\text{año}}$$

Luego, se puede realizar una estimación de la superficie requerida para alcanzar una compensación anual de una tonelada de

MP2,5 al año, tal y como se muestra a continuación:

$$\begin{aligned} 1 \text{ m}^2 &\rightarrow 3,50 \cdot 10^{-4} \frac{\text{t}}{\text{año}} \\ X \text{ m}^2 &\rightarrow 1 \frac{\text{t}}{\text{año}} \\ X &= \frac{1 \frac{\text{t}}{\text{año}} \cdot 1 \text{ m}^2}{3,50 \cdot 10^{-4} \frac{\text{t}}{\text{año}}} = 2.857,1 \text{ m}^2 \sim 2.858 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

A partir del cálculo anterior, se estima que se requieren 2.858 m<sup>2</sup> de techos verdes en configuración de mix que contenga la especie *Sedum álbum* para lograr compensar 1 t/año de MP2,5.

Como segundo ejemplo, se presenta la opción de instalar techos verdes con monoespecie de *L. angustifolia*. Para determinar la capacidad de capturar MP2,5

se utilizan los resultados presentados en la figura 13, a partir de la cual se estima una tasa de captura de  $0,2 \left( \frac{\mu\text{g}}{\text{cm}^2\text{h}} \right)$ . De esta forma, se convierten las unidades para estimar las toneladas de contaminante capturadas por año por cada m<sup>2</sup> de techo verde instalado con la configuración referida, tal y como se muestra a continuación:

$$\begin{aligned} \text{Captura } L. \text{ angustifolia en mono especie} &= 0,2 \frac{\mu\text{g}}{\text{cm}^2\text{h}} \cdot \frac{8.760\text{h}}{\text{año}} \cdot \frac{(100\text{cm})^2}{1\text{m}^2} \cdot \frac{1\text{g}}{10^6\mu\text{g}} \cdot \frac{1\text{t}}{10^6\text{g}} \\ &= 1,75 \cdot 10^{-5} \frac{\text{t}}{\text{m}^2\text{año}} \end{aligned}$$

Luego, se puede realizar una estimación de la superficie requerida para alcanzar una compensación anual de una tonelada de

MP2,5 al año, tal y como se muestra a continuación:

$$\begin{aligned} 1 \text{ m}^2 &\rightarrow 1,75 \cdot 10^{-5} \frac{\text{t}}{\text{año}} \\ X \text{ m}^2 &\rightarrow 1 \frac{\text{t}}{\text{año}} \\ X &= \frac{1 \frac{\text{t}}{\text{año}} \cdot 1 \text{ m}^2}{1,75 \cdot 10^{-5} \frac{\text{t}}{\text{año}}} = 57.142,9 \text{ m}^2 \sim 57.143 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

A partir del cálculo anterior, se estima que se requieren 57.143 m<sup>2</sup> de techos verdes elaborados a partir de mono especie *L. angustifolia* para lograr compensar 1 t/año de MP2,5.

capturar MP2,5 se utilizan los resultados presentados en la figura 14, a partir de la cual se estima una tasa de captura de 1 ( $\frac{\mu\text{g}}{\text{cm}^2\text{h}}$ ). De esta forma, se convierten las unidades para estimar las toneladas de contaminante capturadas por año por cada m<sup>2</sup> de muro verde instalado con la configuración referida, tal y como se muestra a continuación:

A modo de un tercer ejemplo, se presenta la opción de instalar muros verdes con un mix que contenga la especie *Sedum spurium*. Para determinar la capacidad de

$$\text{Captura } S. \text{ spurium en mix} = 1 \frac{\mu\text{g}}{\text{cm}^2\text{h}} \cdot \frac{8.760\text{h}}{\text{año}} \cdot \frac{(100\text{cm})^2}{1\text{m}^2} \cdot \frac{1\text{g}}{10^6\mu\text{g}} \cdot \frac{1\text{t}}{10^6\text{g}} = 8,76 \cdot 10^{-5} \frac{\text{t}}{\text{m}^2\text{año}}$$

Luego, se puede realizar una estimación de la superficie requerida para alcanzar una compensación anual de una tonelada de

MP2,5 al año, tal y como se muestra a continuación:

$$\begin{aligned} 1 \text{ m}^2 &\rightarrow 8,76 \cdot 10^{-5} \frac{\text{t}}{\text{año}} \\ X \text{ m}^2 &\rightarrow 1 \frac{\text{t}}{\text{año}} \end{aligned}$$

$$X = \frac{1 \frac{t}{año} \cdot 1 m^2}{8,76 \cdot 10^{-5} \frac{t}{año}} = 11.415,5 m^2 \sim 11.416 m^2$$

A partir del cálculo anterior, se estima que se requieren 11.416 m<sup>2</sup> de muros verdes en configuración de mix que contenga la especie *Sedum spurium* para lograr compensar 1 t/año de MP2,5.

capacidad de capturar MP2,5 se utilizan los resultados presentados en la figura 14, a partir de la cual se estima una tasa de captura de 0,4 ( $\frac{\mu g}{cm^2 h}$ ). De esta forma, se convierten las unidades para estimar las toneladas de contaminante capturadas por año por cada m<sup>2</sup> de muro verde instalado con la configuración referida, tal y como se muestra a continuación:

Como último ejemplo, se presenta la opción de instalar muros verdes con monoespecie de *Sedum palmeri*. Para determinar la

$$\begin{aligned} \text{Captura } S. \text{ palmeri en monoespecie} &= 0,4 \frac{\mu g}{cm^2 h} \cdot \frac{8.760 h}{año} \cdot \frac{(100 cm)^2}{1 m^2} \cdot \frac{1 g}{10^6 \mu g} \cdot \frac{1 t}{10^6 g} \\ &= 3,50 \cdot 10^{-5} \frac{t}{m^2 año} \end{aligned}$$

Luego, se puede realizar una estimación de la superficie requerida para alcanzar una compensación anual de una tonelada de

MP2,5, tal y como se muestra a continuación:

$$\begin{aligned} 1 m^2 &\rightarrow 3,50 \cdot 10^{-5} \frac{t}{año} \\ X m^2 &\rightarrow 1 \frac{t}{año} \\ X &= \frac{1 \frac{t}{año} \cdot 1 m^2}{3,50 \cdot 10^{-5} \frac{t}{año}} = 28.571,4 m^2 \sim 28.572 m^2 \end{aligned}$$

A partir del cálculo anterior, se estima que se requieren 28.572 m<sup>2</sup> de muros verdes elaborados a partir de monoespecie *Sedum*

*palmeri* para lograr compensar 1 t/año de MP2,5.

## ANEXO 9 — MECANISMO DE COMPENSACIÓN: 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.

En la tabla 37 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 37 – Resumen cumplimiento de criterios mecanismo de compensación: pavimentación de calles**

Criterio	Detalle
Medible	Es posible realizar mediciones de emisiones directamente en la fuente.
Verificable	Para verificar que la reducción de emisiones sea efectiva, se pueden realizar mediciones antes y después de realizar la pavimentación.
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

mecanismo de compensación presentado:

A continuación, en la tabla 38 se listan las principales ventajas y desventajas del

**Tabla 38 – 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) Cada vez quedan menos caminos sin pavimentar en la RM, por lo que resulta complejo encontrar un camino que al pavimentarlo coincida con las emisiones a pavimentar de los proyectos que deben compensar emisiones.</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 “*Upaved 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 39 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 Guía:

**Tabla 39 - Parámetros por defecto factores de emisión para resuspensión de MP10 por tránsito de vehículos en caminos no pavimentados y caminos pavimentados**

Actividad	Ecuación factor de emisión	Unidad	Referencia ecuación factor de emisión	Parámetros factores de emisión		
				Parámetros	Referencias	MP10
Tránsito vehículos camino no pavimentado, dominado por vehículos pesados.	$k \cdot \left(\frac{s}{12}\right)^a \cdot \left(\frac{W}{2,72}\right)^b$	$\frac{g}{km}$	Punto 3.2, <i>Informe final servicio de recopilación y sistematización de factores de emisión al aire para el SEIA.</i>	k: factor de tamaño de partícula.	Punto 3.2, <i>Informe final servicio de recopilación y sistematización de factores de emisión al aire para el SEIA.</i>	422,85
				s: contenido de finos (%).	Valor por defecto, <i>Informe final servicio de recopilación y sistematización de factores de emisión al aire para el SEIA.</i>	8,5
				Constante a.	Punto 3.2, <i>Informe final servicio de recopilación y sistematización de factores de emisión al aire para el SEIA.</i>	0,9
				Constante b.	Punto 3.2, <i>Informe final servicio de recopilación y sistematización de factores de emisión al aire para el SEIA.</i>	0,45

Actividad	Ecuación factor de emisión	Unidad	Referencia ecuación factor de emisión	Parámetros factores de emisión		
				Parámetros	Referencias	MP10
Tránsito vehículos camino no pavimentado, dominado por vehículos livianos.	$k \cdot \left(\frac{S}{12}\right) \cdot \frac{\left(\frac{S}{48,27}\right)^d}{\left(\frac{M}{0,5}\right)^c} - C$	$\frac{g}{km}$	Punto 3.2, Informe final servicio de recopilación y sistematización de factores de emisión al aire para el SEIA.	k: factor de tamaño de partícula.	Punto 3.2, Informe final servicio de recopilación y sistematización de factores de emisión al aire para el SEIA.	507,42
				s: contenido de finos (%).	Punto 3.2 Informe final servicio de recopilación y sistematización de factores de emisión al aire para el SEIA.	8,50
				S: velocidad media de los vehículos (km/h).	Velocidad promedio de circulación de vehículos	25,00
				M: contenido de humedad del material superficial del camino (%).	Caminos Públicos. Punto 3.2, Informe final servicio de recopilación y sistematización de factores de emisión al aire para el SEIA.	0,50
				Constante c.	Punto 3.2, Informe final servicio de recopilación y sistematización de factores de emisión al aire para el SEIA.	0,20
				Constante d.	Punto 3.2, Informe final servicio de recopilación y sistematización de factores de emisión al aire para el SEIA.	0,50
				Constante C.	Punto 3.2, Informe final servicio de recopilación y sistematización de factores de emisión al aire para el SEIA.	0,13
Tránsito vehículos por caminos pavimentados.	$k \cdot sL^{0,91} \cdot W^{1,02}$	$\frac{g}{km}$	Punto 3.1, Informe final servicio de recopilación y sistematización de factores de emisión al aire para el SEIA.	k: factor de tamaño de partícula.	Punto 3.1, Informe final servicio de recopilación y sistematización de factores de emisión al aire para el SEIA.	0,62
				sL: carga de fino en superficie (g/m <sup>2</sup> ), para vías con flujo menor a 500 veh/día	Tabla 4.5 Guía para la estimación de emisiones atmosféricas de proyectos inmobiliarios para la Región Metropolitana (2012).	2,4
				sL: carga de fino en superficie (g/m <sup>2</sup> ), para vías con flujo entre 500 y 10.000 veh/día.	Tabla 4.5 Guía para la estimación de emisiones atmosféricas de proyectos inmobiliarios para la Región Metropolitana (2012).	0,7
				sL: carga de fino en superficie (g/m <sup>2</sup> ), para vías con flujo mayor 10.000 veh/día.	Tabla 4.5 Guía para la estimación de emisiones atmosféricas de proyectos inmobiliarios para la Región Metropolitana (2012).	0,3

Fuente: elaboración propia.

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.  
T<sub>i</sub>: Tara del vehículo de categoría (i).  
P<sub>i</sub>: Peso bruto del vehículo de categoría (i).  
F<sub>i</sub>: Flujo vehicular de la categoría (i).  
F<sub>j</sub>: Flujo vehicular de la categoría (j).

Tomando en cuenta el peso promedio calculado, a partir de la tabla 4.6 y 4.7 de la *Guía para la estimación de emisiones atmosféricas de proyectos inmobiliarios para la Región Metropolitana* (Seremi MA, 2012), se deberán considerar los siguientes criterios para la estimación del factor de emisión para vehículos que circulan en caminos no pavimentados:

Si  $W \geq 2,7$  → Utilizar fórmula y parámetros para Tránsito vehículos camino no pavimentado, dominado por vehículos **pesados** de la tabla 39.

Si  $W < 2,7$  → Utilizar fórmula y parámetros para Tránsito vehículos camino no

pavimentado, dominado por vehículos **livianos** de la tabla 39.

### 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.
- Bicicleta.

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 laborales, 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 estar certificada por la Secretaría de Planificación de Transporte (Sectra).
- 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.

## Plan de seguimiento

Además de los parámetros requeridos para el plan de seguimiento de un PCE presentados en el capítulo 5 de esta Guía, 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 40:

**Tabla 40 - Acreditación plan de seguimiento: pavimentación de calles**

Ítem	Forma de acreditación
Acreditación supuesto de estado inicial de fuente a compensar.	Verificación del estado inicial de la calle a pavimentar. Esto deberá ser constatado mediante visita a terreno en conjunto con la autoridad.  A) Para dar cuenta del inicio de las obras de pavimentación se deberá presentar la siguiente documentación: <ul style="list-style-type: none"><li>– Certificado otorgado por la municipalidad y el SERVIU donde se constate que no existe proyecto de pavimentación para la calle seleccionada.</li><li>– Contrato con empresa encargada de la pavimentación.</li><li>– Copia del proyecto de urbanización aprobado.</li><li>– Registro fotográfico de inicio de actividades de pavimentación para ver el estado inicial de la calle.</li><li>– 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.</li></ul>
Acreditación de la ejecución del PCE.	B) Para dar cuenta del término de las obras de pavimentación, se deberá presentar la siguiente información: <ul style="list-style-type: none"><li>– Copia de recepción de obras por parte del SERVIU y la municipalidad.</li><li>– Registro fotográfico de las calles pavimentadas.</li><li>– 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.</li></ul>

Fuente: elaboración propia.

## Ejemplo de cálculo aplicado

Un proyecto debe compensar 40 toneladas de material particulado respirable (MP10) por resuspensión de polvo en su primer año de la fase de construcción. Para ello el titular ha decidido compensar las emisiones por medio de la pavimentación de una calle. Para el caso del ejemplo se considera un

escenario conservador, ya que el titular decidió medir solo un día de semana, por lo que el cálculo del flujo anual estará dado por la siguiente expresión, que representa considerar 247 días hábiles con el flujo medido, 50 sábados con la mitad del flujo medido y 68 domingos y festivos sin flujo, de acuerdo a lo presentado en el inciso 17.3.2 de esta Guía:

$$\text{Flujo vehicular anual} \left( \frac{\text{veh}}{\text{año}} \right) = \left( \sum_{i=1}^N \text{FVL}_i \right) \cdot 247 + \left( \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^N \text{FVL}_i \right) \cdot 50 + 0 \cdot 68$$

Luego, en la tabla 41 se presenta el resumen de las mediciones de flujo vehicular realizadas en la calle:

**Tabla 41 – Resumen medición de flujo ejemplo aplicado**

Parámetros	Tipo de vehículo					Total
	Vehículos livianos	Taxis colectivos	Buses	Camiones dos ejes	Camión de más de dos ejes	
Flujo (veh/día), dirección oriente – poniente	650	20	14	41	61	786
Flujo (veh/día), dirección poniente – oriente	518	24	8	24	65	639
Flujo total (veh/día)	1.168	44	22	65	126	1.425
Flujo anual estimado (veh/año)[1]	317.696	11.968	5.984	17.680	34.272	387.600
Porcentaje del flujo vehicular Total (%)	81,96%	3,09%	1,54%	4,56%	8,84%	100,00%
Peso promedio de vehículo (ton)	1,2	1,2	15	25	25	-
Peso promedio de vehículo que circula en la vía (ton)						4,60

Fuente: Elaboración propia.

A partir de la medición de flujo vehicular, en la calle circula un total aproximado de 387.600 vehículos al año con un peso promedio de la flota de 4,6 toneladas.

Considerando los parámetros por defecto y las ecuaciones presentadas en esta Guía, se presenta a continuación el cálculo de los factores de emisión:

$$\text{FE MP10 no pavimentado} = k \cdot \left(\frac{s}{12}\right)^a \cdot \left(\frac{W}{2,72}\right)^b$$

$$\text{FE MP10 no pavimentado} = 422,85 \cdot \left(\frac{8,5}{12}\right)^{0,9} \cdot \left(\frac{4,6}{2,72}\right)^{0,45} = 392,72 \left(\frac{\text{g}}{\text{km}}\right)$$

$$\text{FE MP10 pavimentado} = k \cdot sL^{0,91} \cdot W^{1,02}$$

$$\text{FE MP10 pavimentado}^8 = 0,62 \cdot 0,7^{0,91} \cdot 4,6^{1,02} = 2,13 \left(\frac{\text{g}}{\text{km}}\right)$$

A partir de los factores de emisión y nivel de actividad presentados, se muestra a continuación el cálculo para la emisión del

caso base por metro lineal, que considera la calle sin pavimentar:

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

$$\text{Emisión}_{\text{Caso Base}} = 392,72 \left(\frac{\text{g MP}}{\text{km}}\right) \cdot 387.600 \left(\frac{\text{vehículos}}{\text{año}}\right) \cdot \frac{1 \text{ t}}{10^6 \text{ g}} \cdot \frac{1 \text{ km}}{1.000 \text{ m}} = 0,1522 \left(\frac{\text{t MP}}{\text{año m}}\right)$$

Luego, se presenta el cálculo para la emisión del caso con mecanismo por metro lineal, que considera la calle pavimentada. Es importante mencionar que se trabaja

bajo el supuesto de que el flujo vehicular aumentará un 5% respecto al caso base por incentivo de uso de la calle producto de su pavimentación:

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

$$\text{Emisión}_{\text{Con Mecanismo}} = 2,13 \left(\frac{\text{g MP}}{\text{km}}\right) \cdot 406.980 \left(\frac{\text{vehículos}}{\text{año}}\right) \cdot \frac{1 \text{ t}}{10^6 \text{ g}} \cdot \frac{1 \text{ km}}{1.000 \text{ m}} = 0,0009 \left(\frac{\text{t MP}}{\text{año m}}\right)$$

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 metros de calle a pavimentar para cumplir con las toneladas totales de contaminante a compensar:

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

$$\text{Reducción unitaria} = 0,1522 \left(\frac{\text{t}}{\text{año m}}\right) - 0,0009 \left(\frac{\text{t}}{\text{año m}}\right) = 0,1513 \left(\frac{\text{t}}{\text{año m}}\right)$$

<sup>8</sup> Para sL se ha utilizado el valor para flujo entre 500 y 5.000 vehículos/día. *Informe final servicio de recopilación y sistematización de factores de emisión al aire para el SEIA.*

$$\text{Metros de calle a pavimentar} = \frac{\text{Toneladas a compensar}}{\text{Reducción unitaria por metro}}$$

$$\text{Metros de calle a pavimentar} = \frac{40 \left( \frac{\text{t}}{\text{año}} \right)}{0,1513 \left( \frac{\text{t}}{\text{año m}} \right)}$$

$$\text{Metros de calle a pavimentar} = 264,4 \text{ (m)} \sim 265 \text{ (m)}$$

A partir de los cálculos realizados, el proyecto deberá realizar, como mínimo, la pavimentación de 265 metros en la calle donde se midió el flujo vehicular dentro de la Región Metropolitana para así dar cumplimiento a las toneladas totales a compensar de acuerdo a su RCA. Es

importante mencionar que el titular deberá considerar realizar la pavimentación en tramos completos entre intersecciones de la calle a pavimentar (no se aceptarán pavimentaciones de tramos de calle incompletos).

## ANEXO 10 — RESUMEN COSTO EFECTIVIDAD DE MECANISMOS DE COMPENSACIÓN

Con el fin de cuantificar la capacidad de compensación de los mecanismos seleccionados y contar con un orden de magnitud de los costos asociados a la implementación de los mismos y su capacidad de compensación.

En la tabla 42 se presenta un resumen para los mecanismos seleccionados, en donde se comparan los valores estimados para lograr la compensación de una (1) tonelada de material particulado respirable fino (MP2,5) al año, exceptuando el mecanismo 5 y el mecanismo 6, para los cuales se presenta lo requerido para compensar 1 tonelada de NO<sub>x</sub> al año, debido a que es el contaminante objetivo de dichos mecanismos y exceptuando el mecanismo 8 en donde se presenta el cálculo para compensar una tonelada de material

particulado respirable (MP10) al año, debido a que corresponde a un mecanismo asociado a la compensación de emisiones por resuspensión de polvo.

Cabe destacar que los valores presentados en la tabla son respecto a reducción en toneladas anuales y no consideran prorrateo de emisiones.

También, es importante mencionar que los precios presentados en la tabla son referenciales al año 2019, obtenidos en base a la experiencia del Consultor y de información proporcionada por empresas chilenas proveedoras de los mecanismos propuestos. Los valores podrán cambiar en función de la cantidad de unidades de cada mecanismo requeridas y en función de la evolución del mercado chileno.

**Tabla 42 – Resumen costo efectivo de mecanismos de compensación de emisiones**

Mecanismo	N° elementos para compensar 1 t/año de contaminante		Rango de costos aproximado mecanismo				Rango de costos totales aproximado			
	Valor	Unidad	Valor		Unidad	Valor		Unidad		
1) Recambio de calefactores	53	estufas a pellet <sup>9</sup>	500.000	-	800.000	\$/estufa a pellet	26.650.000	-	42.400.000	CLP/ 1 t/año de MP2,5
	46	split eléctrico <sup>10</sup>	850.000			\$/split eléctrico	39.100.000			CLP/ 1 t/año de MP2,5
2) Chatarrización de motores <sup>11</sup>	13	camiones	9.000.000	-	12.000.000	\$/camión chatarrizado	117.000.000	-	156.000.000	CLP/ 1 t/año de MP2,5
3) Filtro para fuente fija industrial <sup>12</sup>	7	filtros industriales	8.000.000	-	10.000.000	\$/filtro industrial	56.000.000	-	70.000.000	CLP/ 1 t/año de MP2,5
4) Filtro DPF para fuente móvil <sup>13</sup>	77	filtros DPF	3.900.000	-	4.100.000	\$/filtro DPF	300.300.000	-	315.700.000	CLP/ 1 t/año de MP2,5

<sup>9</sup> Considera recambio de estufa a doble cámara por estufa a *pellet*, considerando valores por defecto presentados en esta Guía. Los costos son estimados a partir de experiencia del Consultor.

<sup>10</sup> El valor corresponde a la cantidad de calefactores a cambiar considerando los valores por defecto presentados en esta Guía, los costos corresponden una estimación en base a la experiencia del Consultor

<sup>11</sup> Considera la chatarrización de un camión sin norma de emisión y la incorporación de un camión EURO VI a la flota vehicular. Se considera en la estimación de emisiones el MP2,5 sumado al MP2,5 secundario generado por NOx. Los costos son estimados a partir de experiencia del Consultor.

<sup>12</sup> Considera como ejemplo la aplicación de Filtro Vivo a un grupo generador de 492 kVA de potencia máxima utilizada que opera cuatro horas al día. Los costos son estimados a partir de información proporcionada por FiltroVivo.

<sup>13</sup> Considera la implementación del filtro DPF en un bus interurbano EURO III estimado a partir de los valores por defecto presentados en esta Guía. Los costos son estimados a partir de información proporcionada por Purexhaust S.A.

Mecanismo	N° elementos para compensar 1 t/año de contaminante		Rango de costos aproximado mecanismo		Rango de costos totales aproximado	
	Valor	Unidad	Valor	Unidad	Valor	Unidad
5) Regeneración de sistema SCR para fuentes móviles <sup>14</sup>	3	Buses	6.000.000	\$/regeneración	18.000.000	CLP/ 1 t/año de NOx
6) Mejoras tecnológicas para calderas domiciliarias e industriales <sup>15</sup>	1	Caldera ignotubular. Caso aplicado a Hospital del Salvador	-	-	28.200.000 <sup>16</sup>	CLP/ 1 t/año de NOx
7) Techos y/o muros verdes <sup>17</sup>	2.854	m <sup>2</sup> de techo verde	3,5	UF/m <sup>2</sup>	282.209.228	CLP/ 1 t/año de MP2,5
	9.513	m <sup>2</sup> de muro verde	6		1.612.567.656	CLP/ 1 t/año de MP2,5

<sup>14</sup> Considera la implementación sobre un bus con una emisión base de 7,69 g NOx/km y una emisión con regeneración de 1,69 g NOx/km. Los costos son estimados a partir de información proporcionada por Purexhaust S.A.

<sup>15</sup> La información proporcionada respecto a la capacidad de compensación y costos corresponden para el caso específico aplicado al Hospital del Salvador, información proporcionada por Abasterm S.A, presentada con detalle en el anexo 7 de esta Guía.

<sup>16</sup> El costo estimado considera modulación electrónica + variador + control de combustión electrónico según residual de oxígeno (Trim O<sub>2</sub>), un sistema FGR (*flue gas recirculation*), el montaje y desmontaje del sistema, los muestreos y la medición de material particulado. Los costos son estimados a partir de un caso real aplicado a una caldera del Hospital del Salvador con información proporcionada por Abasterm S.A.

<sup>17</sup> Considera la especie *Sédum album* en mix para techos verdes y en mono especie para muros verdes. Precios referenciales en base a información de VerdeActivo y considerando la UF del 04/12/2019 equivalente a \$28.252.

Mecanismo	N° elementos para compensar 1 t/año de contaminante		Rango de costos aproximado mecanismo		Rango de costos totales aproximado	
	Valor	Unidad	Valor	Unidad	Valor	Unidad
8) Pavimentación de calles <sup>18</sup>	6,6	metros	600.000	\$/metro	3.960.000	CLP/ 1 t/año de MP10

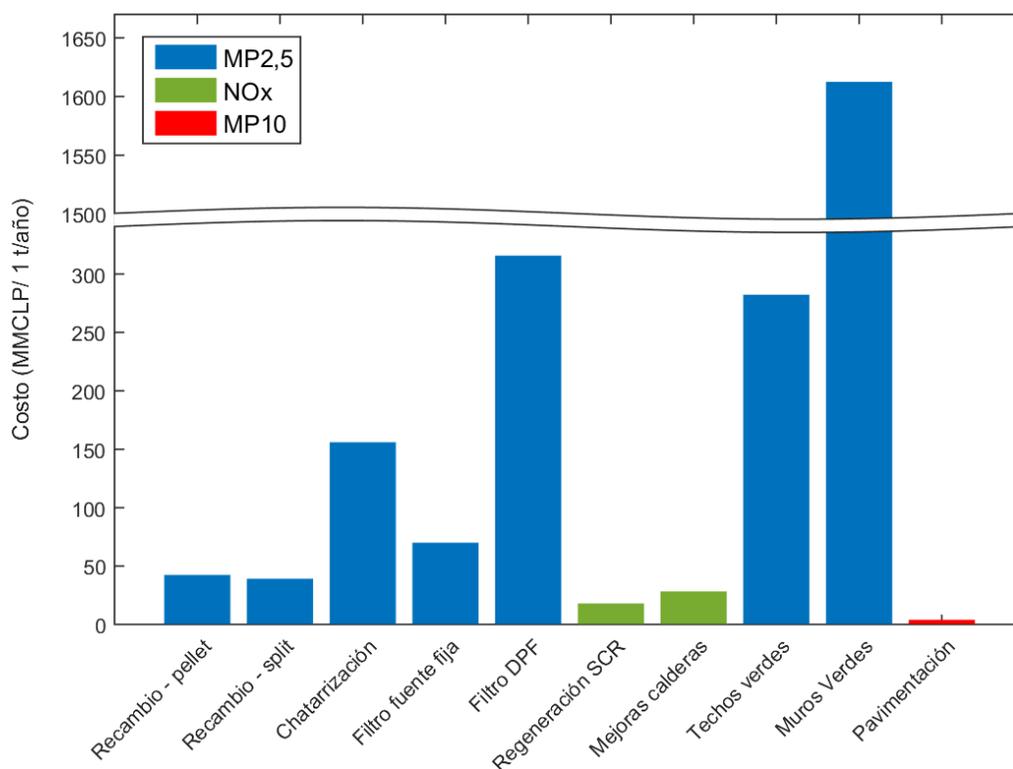
Fuente: elaboración propia.

<sup>18</sup> Considera la base de cálculo con mediciones de flujo vehicular de una calle de ejemplo presentada en el anexo 9 de esta Guía, los metros y costos pueden variar de acuerdo al flujo vehicular particular de la calle estudiada. Los costos son estimados a partir de la experiencia del Consultor, considerando aproximadamente USD 800.000 por kilómetro pavimentado considerando el cambio de dólar a \$750. Este mecanismo fue incluido en la Guía a petición de la contraparte técnica y los valores presentados corresponden a la compensación de emisiones de MP10 por resuspensión de polvo.

Para comparar la capacidad costo efectiva de los mecanismos de compensación propuestos, en la figura 15 se presentan los

costos asociados a la compensación de una tonelada por año de contaminante para cada mecanismo:

**Figura 15 – Costos asociados a la compensación de 1 tonelada por año de contaminante para los mecanismos propuestos<sup>19</sup>.**



Fuente: elaboración propia.

<sup>19</sup> Para aquellos mecanismos en donde se presentaron rangos de costos en la tabla anterior, se consideraron los valores máximos para efectos de esta figura.

## ANEXO 11 — FORMATO DE INGRESO DE NUEVOS MECANISMOS DE COMPENSACIÓN

Los ocho mecanismos presentados en esta *Guía de alternativas de compensación de emisiones para fuentes de combustión*, 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 a la presente Guía. 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 de la Guía.

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 43:

**Tabla 43 – Resumen cumplimiento de criterios mecanismo de compensación**

Criterio	Detalle
Medible	
Verificable	
Adicional	
Permanente	

Fuente: elaboración propia.

### 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 5 de esta Guía, se debe completar la tabla 44, indicando los parámetros relevantes.

**Tabla 44 - Acreditación plan de seguimiento**

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

Fuente: 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 esta Guía.

## ANEXO 12 — MANUAL DE INSTRUCCIONES PARA ENTREGA DE ARCHIVOS DIGITALES (SHAPE)

Con el fin de que la autoridad pueda tener información georreferenciada de todos los PCE aprobados en la Región Metropolitana y que esta información sea de conocimiento público, los titulares, además de presentar el informe del Programa de Compensación de Emisiones, deberán incluir uno o más archivos en formato SHAPE con información relevante de su PCE.

A continuación, se presenta en este anexo un manual de instrucciones para orientar a

los titulares al llenado de la información de interés y su posterior traspaso a archivo digital georreferenciado (SHAPE).

La información relevante para cada PCE que deberá ser incorporada en la tabla de atributos del archivo digital (SHAPE) corresponde a la que se muestra en la tabla 45, donde para cada ítem se explica el formato y un ejemplo.

**Tabla 45 - Información a incorporar en tabla de atributos del archivo SHAPE**

Ítem	Formato	Ejemplo
<b>FID</b>	Código para identificar a cada beneficiario. Deberá seguir la lógica AÑO-RCA-RE-Número correlativo (Año, RCA y RE deberán considerar 4 dígitos, si es un número con menos de 4 dígitos se deberá rellenar con tantos ceros como sea necesario al inicio del número, el número correlativo deberá comenzar en 1 y continuar correlativamente hasta completar la cantidad de beneficiarios).	2019-0123-0010-1
<b>RCA del proyecto.</b>	Año/Número (4 dígitos cada uno, si es un número con menos de 4 dígitos se deberá rellenar con tantos ceros como sea necesario al inicio del número)	0123/2019
<b>RE (resolución exenta) de aprobación del PCE.</b>	Año/Número (4 dígitos cada uno, si es un número con menos de 4 dígitos se deberá rellenar con 0 al inicio del número)	0010/2019
<b>Año de ejecución del PCE.</b>	Año en número	2019
<b>PPDA aplicable al PCE</b>	DS NN/AA <sup>20</sup>	DS 31/16

<sup>20</sup> NN: número del DS, AA: últimos dos dígitos del año correspondiente.

Ítem	Formato	Ejemplo
<b>Fase de compensación (construcción, operación o cierre),<sup>21</sup></b>	Mayúscula y sin tildes	CONSTRUCCION
<b>Información de contacto del titular</b>	Nombre	Mayúscula y sin tildes
	Mail	Mayúscula y sin tildes
	Teléfono	11 dígitos incluyendo código de país y ciudad
<b>Información de contacto de la empresa proveedora de la tecnología</b>	Nombre	Mayúscula y sin tildes
	Mail	Mayúscula y sin tildes
	Teléfono	11 dígitos incluyendo código de país y ciudad
	Nombre	Mayúscula y sin tildes
	Dirección	
	Comuna	
	Provincia	
	Mail	
Teléfono	11 dígitos incluyendo código de país y ciudad	
<b>Contaminante a compensar</b>	Nombre de contaminante abreviado en mayúscula y sin tildes (MP2,5, MP10, NOX, SOX)	NOX
<b>Toneladas a compensar según la RCA</b>	Número de toneladas año a compensar	16,66
<b>Toneladas totales compensadas</b>	Número de toneladas año compensadas, considerando el porcentaje de incremento de acuerdo al PPDA que aplica. Por ejemplo, si aplica el DS 31/2016 será el 120% y si aplica el DS 66/2009 será el 150% de las emisiones a compensar según la RCA.	20
<b>Toneladas unitarias compensadas</b>	Número de toneladas año compensadas por mecanismo (corresponde a la división entre las toneladas totales y el total de elementos instalados)	1,5
<b>Nº de identificación fuente antigua</b>	Números y/o letras. Considerar mayúscula y sin tildes	AF8673
<b>Nº de serie fuente nueva</b>	Números y/o letras. Considerar mayúscula y sin tildes	G00001
<b>Coordenadas de ubicación</b>	Este (m)	Coordenadas en formato UTM WGS-84 Huso 19 Sur. Ingresar solo números sin puntos y máximo dos decimales separado por punto
	Norte (m)	

Fuente: elaboración propia.

<sup>21</sup> Si el proyecto debe compensar por el traslape de más de una fase (por ejemplo, que en un año coincidan las fases de construcción y operación), se deberá especificar que se están compensando ambas fases.

Se deberán llenar los datos que aparecen en la planilla. En el caso de ser más de un beneficiario se puede llenar con más de una fila

en la misma planilla, tal y como se muestra en el ejemplo de la figura 16:

**Figura 16 – Ejemplo llenado de datos archivo Excel**

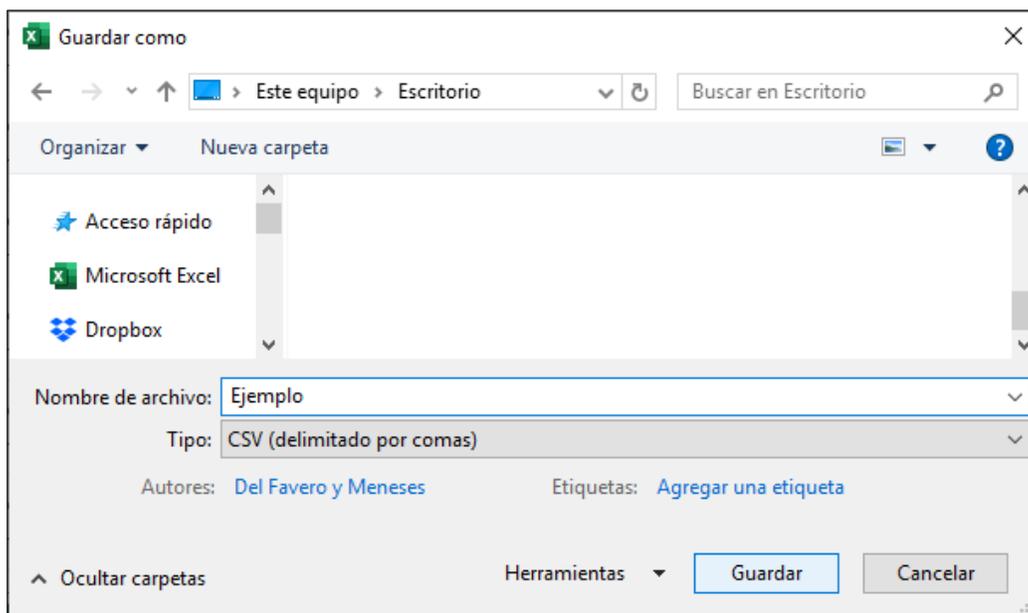
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	
FID	RCA	RÉX	ANO EJECUCI	PPDA	FASE	NOMBRE TIT	TELEFONO TITULAR	MAIL TITULAR	NOMBRE PR	TELEFONO PRO MAIL	PROVE	NOMBRE BE	DIRECCION	COMUNA	PROVINCIA	TELEFONO BENEFICIARIO	MAIL BENEF	CONTAMINA	TONELADAS	TONELADAS	TONELADAS	NUM IDENTI	NUM SERIE	ESTE	NORTE	
2019-0123-001-1	2019/0123	0010/2019	2019	DS 31/16	CONSTRUCCI	TITULAR	56991234567	TITULAR@M	PROVEEDOR	56991234567	PROVEEDOR	BENEFICIARI	CALLE 1	COMUNA	PROVINCIA	56991234567	BENEFICIARI	MP2.5		3	3.6	0.9	ID 11	A001	325362.81	6315546.79
2019-0123-001-2	2019/0123	0010/2019	2019	DS 31/16	CONSTRUCCI	TITULAR	56991234567	TITULAR@M	PROVEEDOR	56991234567	PROVEEDOR	BENEFICIARI	CALLE 2	COMUNA	PROVINCIA	56991234567	BENEFICIARI	MP2.5		3	3.6	0.9	ID 12	A002	325415.16	6315580.46
2019-0123-001-3	2019/0123	0010/2019	2019	DS 31/16	CONSTRUCCI	TITULAR	56991234567	TITULAR@M	PROVEEDOR	56991234567	PROVEEDOR	BENEFICIARI	CALLE 3	COMUNA	PROVINCIA	56991234567	BENEFICIARI	MP2.5		3	3.6	0.9	ID 13	A003	325463.25	6315636.56
2019-0123-001-4	2019/0123	0010/2019	2019	DS 31/16	CONSTRUCCI	TITULAR	56991234567	TITULAR@M	PROVEEDOR	56991234567	PROVEEDOR	BENEFICIARI	CALLE 4	COMUNA	PROVINCIA	56991234567	BENEFICIARI	MP2.5		3	3.6	0.9	ID 14	A004	325523.08	6315593.82

Fuente: elaboración propia.

Una vez llenados los datos, se deberá guardar la planilla en formato .csv (valores

separados por coma), tal y como se muestra en la figura 17:

Figura 17 – Ejemplo para guardar archivo Excel en formato .csv



Fuente: elaboración propia.

Luego, se deberá transformar el archivo en formato .csv a formato SHAPE. Para esto, se presenta a continuación como ejemplo la explicación para realizarlo utilizando el *software* QGIS (Quantum GIS), que

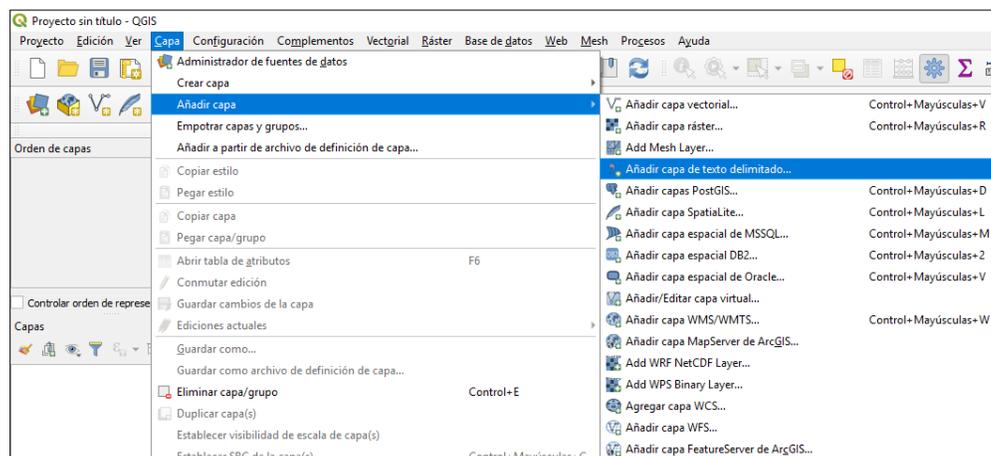
corresponde a un programa de sistema de información geográfico de código abierto y libre, disponible para descarga en su sitio web:

<https://www.qgis.org/es/site/index.html>

Una vez descargado e instalado el software, se deberá acceder al menú para crear una capa a partir de un texto delimitado por

comas, tal y como se muestra en la figura 18:

Figura 18 – Acceso a opción de ingreso de archivo en formato .csv a QGIS

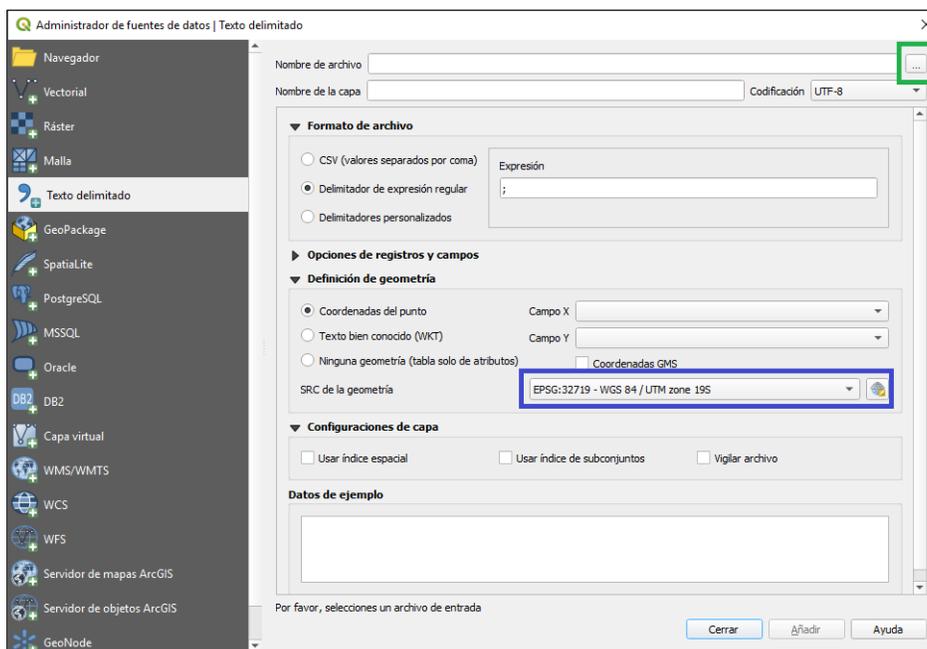


Fuente: elaboración propia.

Una vez seleccionada la opción de la figura anterior, se abrirá un menú con opciones tal y como se muestra en la figura 19. Se deberá verificar que el sistema de referencia de coordenadas sea en UTM WGS-84 huso 19 sur (recuadro azul en la figura). Luego se deberá dar clic en el ícono “...” (marcado

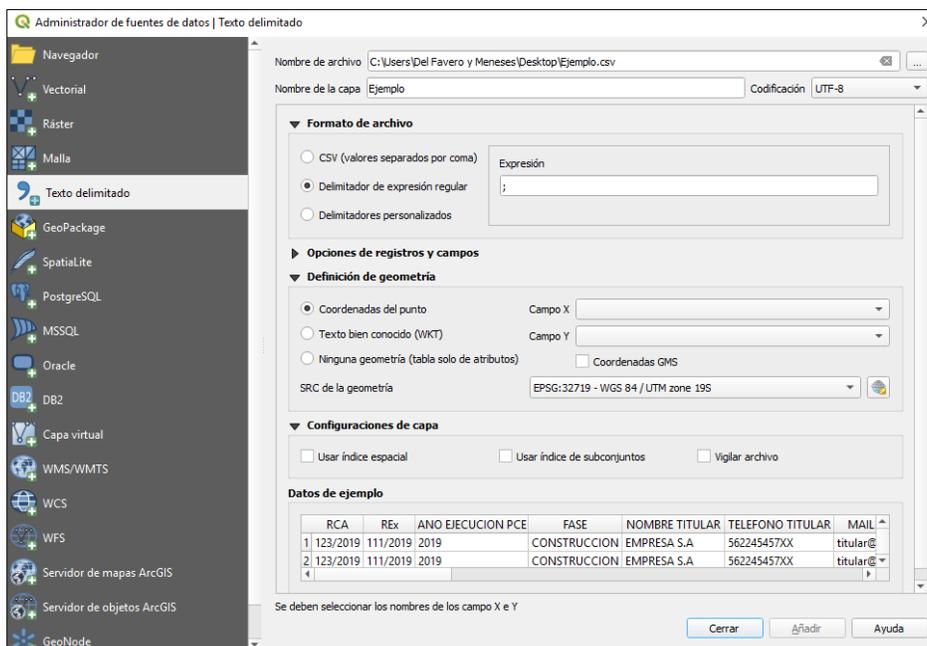
en un cuadrado verde en la figura), para buscar el archivo en formato .csv que se quiere pasar a SHAPE. Una vez seleccionado se da clic en “Abrir” y aparecerá un menú como el que se muestra en la figura 20:

Figura 19 –Menú para ingreso de archivo en formato .csv a QGIS



Fuente: elaboración propia.

Figura 20 – Archivo .csv cargado en QGIS

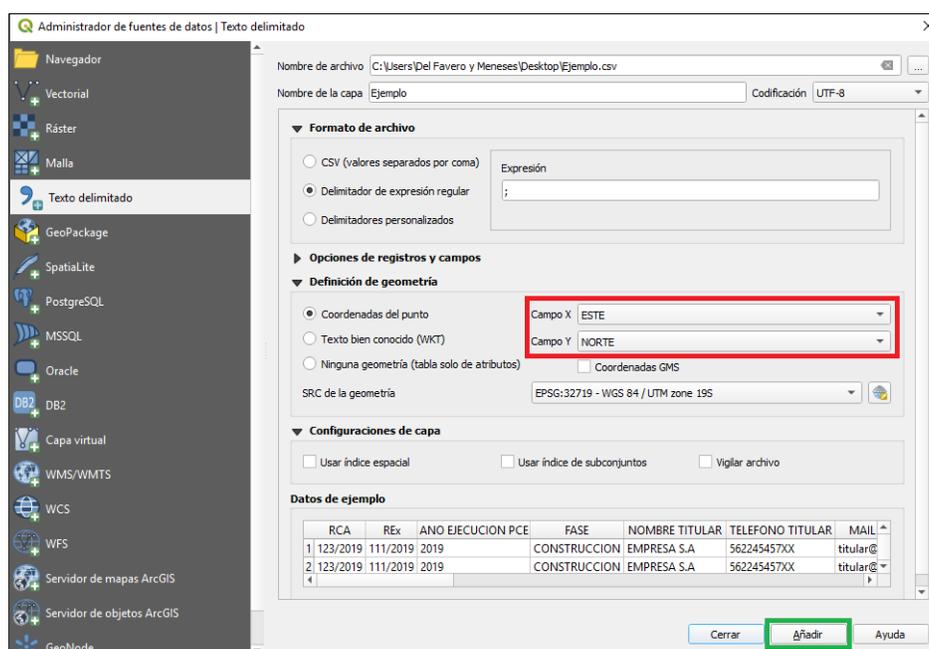


Fuente: elaboración propia.

Una vez cargado el archivo, se deberán indicar las columnas que tienen la información de la georreferenciación, es decir, el campo X y el campo Y que aparecen en la figura anterior, los que representan las columnas ESTE y NORTE del archivo ingresado, respectivamente. Para ingresarlo se deben abrir las pestañas del

campo X y el campo Y, y asignar las columnas, tal y como se muestra en el recuadro en rojo de la figura 21. Una vez llenados los campos X e Y con las columnas ESTE y NORTE respectivamente, se deberá clicar en el botón “Añadir”, marcado en color verde en la misma figura.

**Figura 21 –Asignación de campo X y campo Y para la georreferenciación en QGIS**

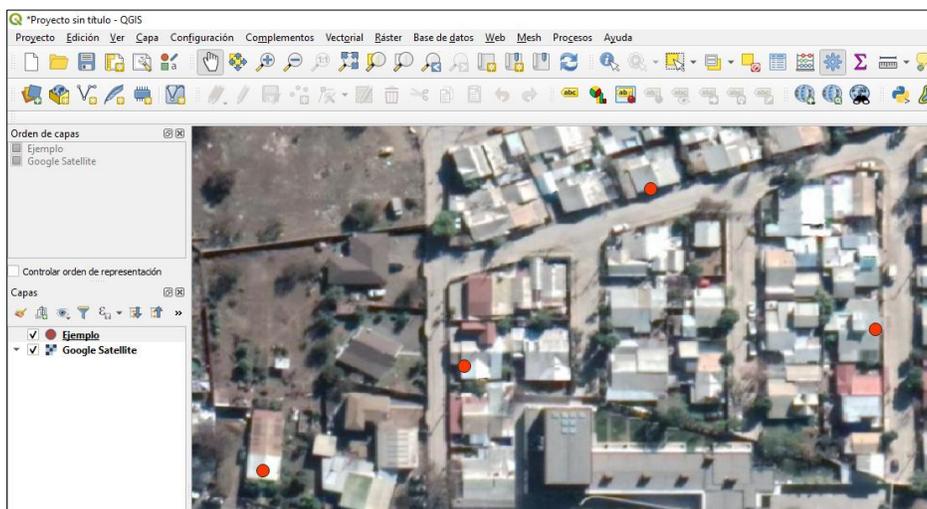


Fuente: elaboración propia.

Los puntos ingresados quedan en un archivo con información de interés del PCE en formato georreferenciado, tal y como se

muestra en los puntos de color rojo en la figura 22:

Figura 22 – Ejemplo ingreso de archivo .csv a QGIS<sup>22</sup>

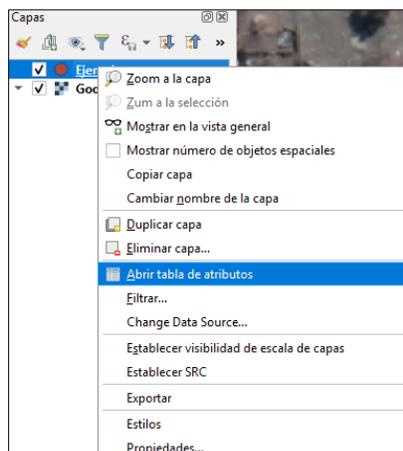


Fuente: elaboración propia.

Para verificar que el archivo ingresado contiene la información llenada por el titular en la planilla, se puede clicar con el botón

derecho en el archivo y elegir la opción “Abrir tabla de atributos”, tal y como se muestra en la figura 23:

Figura 23 – Ingreso a visualizar la tabla de atributos de un archivo en QGIS



Fuente: elaboración propia.

<sup>22</sup> Nota: para efectos del ejemplo, se ha incluido un mapa de fondo descargado de Google Satellite, para visualizar la georreferenciación de los puntos. Sin embargo, basta con que aparezcan los puntos en el programa con fondo color blanco para que el ingreso del archivo .csv sea satisfactorio.

Al elegir esta opción, se abrirá la tabla de atributos con la información ingresada. De esta forma se puede confirmar que el archivo georreferenciado efectivamente contiene la

información relevante para el PCE, tal y como se muestra en la figura 24:

**Figura 24 – Ejemplo tabla de atributos archivo en formato .csv ingresado a QGIS**

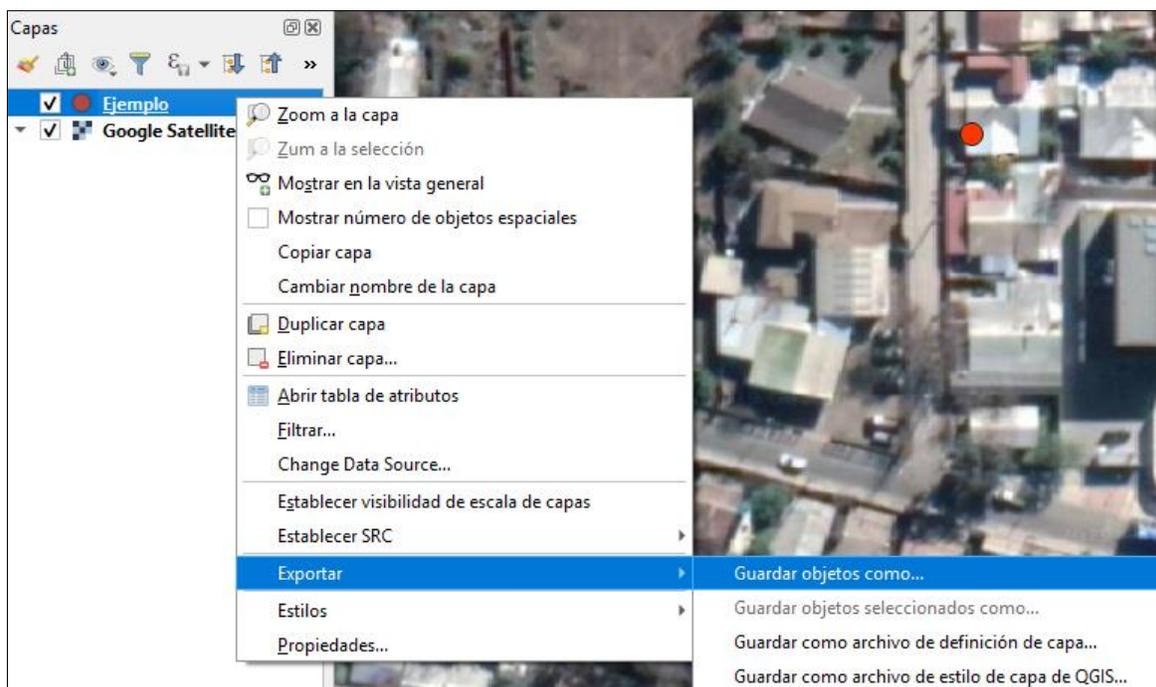
FID	RCA	REx	NO EJECUCION PC	PPDA	FASE	NOMBRE TITULAR	ELEFONO TITULAR	MAIL TITULAR	OMBRE PROVEEDC	EFOFONO PROVEED	MAIL PROVEEDOR	OMBRE BENEFICIAF	CCIÓN BENEFICIA	COMUNA	PROVINCIA	EFOFONO BENEFICIA	MAIL BENEFICIAF	CONTAMINANTE	
1	2019-0123-001-1	2019/0123	0010/2019	2019	DS 31/16	CONSTRUCCION	TITULAR	56991234567	TITULAR@MAL...	PROVEEDOR	56991234567	PROVEEDOR@...	BENEFICIARIO 1	CALLE 1	COMUNA	PROVINCIA	56991234567	BENEFICIARIO1...	MP2.5
2	2019-0123-001-2	2019/0123	0010/2019	2019	DS 31/16	CONSTRUCCION	TITULAR	56991234567	TITULAR@MAL...	PROVEEDOR	56991234567	PROVEEDOR@...	BENEFICIARIO 2	CALLE 2	COMUNA	PROVINCIA	56991234567	BENEFICIARIO2...	MP2.5
3	2019-0123-001-3	2019/0123	0010/2019	2019	DS 31/16	CONSTRUCCION	TITULAR	56991234567	TITULAR@MAL...	PROVEEDOR	56991234567	PROVEEDOR@...	BENEFICIARIO 3	CALLE 3	COMUNA	PROVINCIA	56991234567	BENEFICIARIO3...	MP2.5
4	2019-0123-001-4	2019/0123	0010/2019	2019	DS 31/16	CONSTRUCCION	TITULAR	56991234567	TITULAR@MAL...	PROVEEDOR	56991234567	PROVEEDOR@...	BENEFICIARIO 4	CALLE 4	COMUNA	PROVINCIA	56991234567	BENEFICIARIO4...	MP2.5

Fuente: elaboración propia.

Una vez cargado el archivo, se deberá guardar en formato SHAPE. Para esto hay que hacer clic con el botón derecho en el archivo cargado y seleccionar la opción

“Exportar”, y luego en “Guardar objetos como...”, del modo en que se muestra en la figura 25:

**Figura 25 – Ingreso a opción para guardar archivo en formato SHAPE en QGIS**

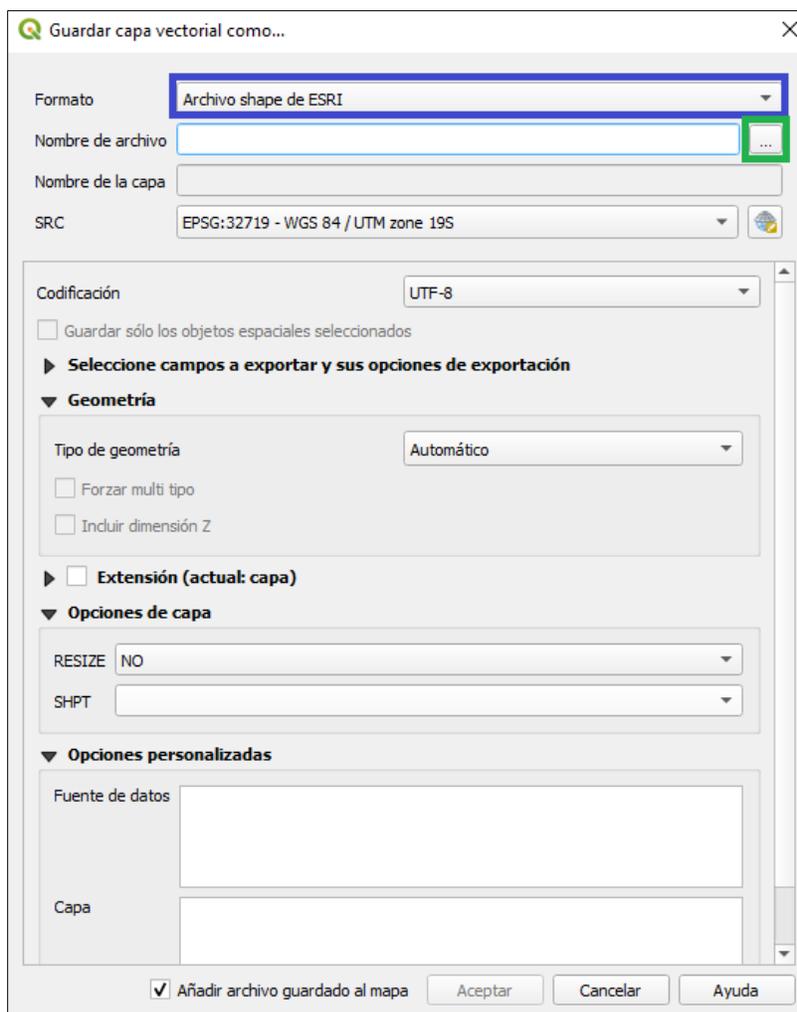


Fuente: elaboración propia.

Se abrirá un menú como el que se muestra en la figura 26. En “Formato” se deberá seleccionar “Archivo shape de ESRI” (ver cuadro azul en la figura). Luego es

necesario seleccionar la ubicación donde será guardado el archivo clicando en “...” (ver cuadro verde en la figura).

Figura 26 – Ingreso a opción para guardar archivo en formato SHAPE en QGIS

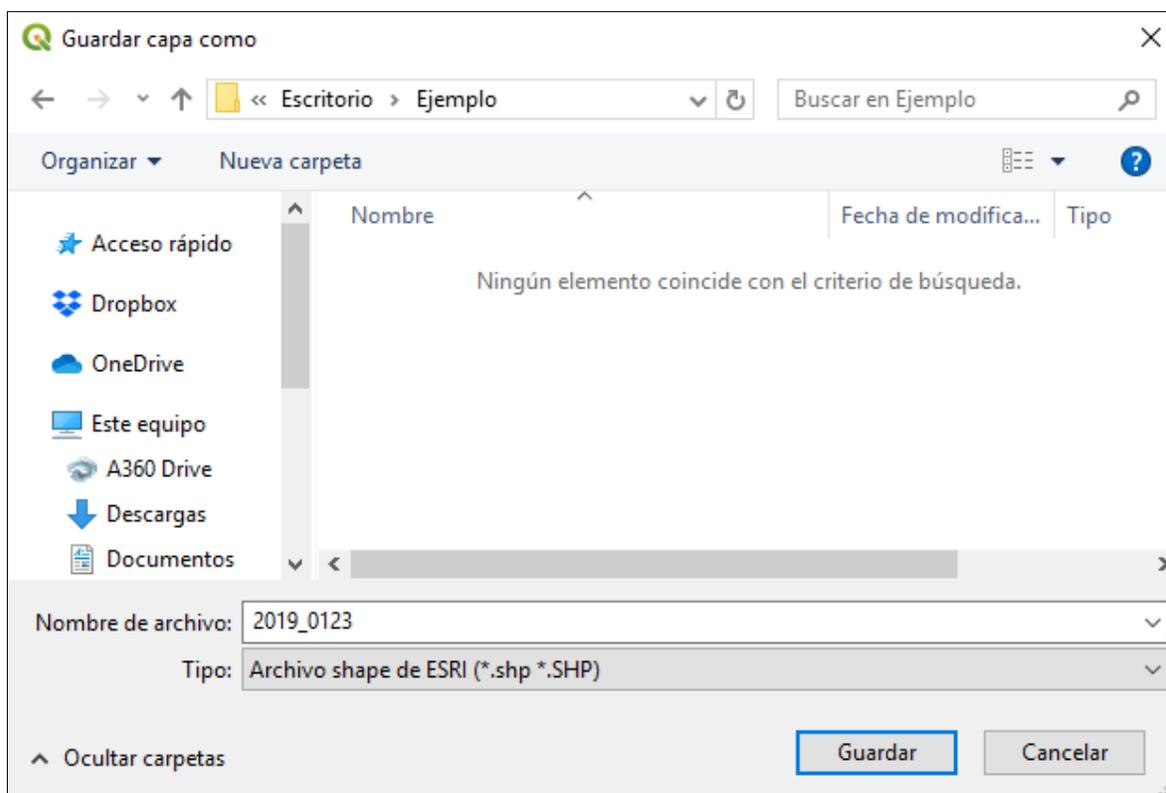


Fuente: elaboración propia.

Se recomienda crear una carpeta nueva para guardar los archivos. Después se deberá guardar el archivo con el nombre indicando el año y el número de la

Resolución de Calificación Ambiental (RCA) que aprobó el proyecto, siguiendo la lógica “Año\_Número”, tal y como se muestra en el ejemplo de la figura 27:

**Figura 27 - Ejemplo de nombre a asignar para SHAPE**



Fuente: elaboración propia.

Una vez seleccionado el nombre del archivo, se da clic en “Guardar” y aparecerá lo que se muestra en el ejemplo de la figura

28. Tras hacer clic en “Aceptar” (ver cuadro verde en la figura) el proceso termina.

Figura 28 – Archivo ingresado para guardado en formato SHAPE

Guardar capa vectorial como...

Formato: Archivo shape de ESRI

Nombre de archivo: C:\Users\Del Favero y Meneses\Desktop\Ejemplo\2019\_0123.shp

Nombre de la capa:

SRC: EPSG:32719 - WGS 84 / UTM zone 19S

Codificación: UTF-8

Guardar sólo los objetos espaciales seleccionados

► **Seleccione campos a exportar y sus opciones de exportación**

▼ **Geometría**

Tipo de geometría: Automático

Forzar multi tipo

Incluir dimensión Z

►  **Extensión (actual: capa)**

▼ **Opciones de capa**

RESIZE: NO

SHPT:

▼ **Opciones personalizadas**

Fuente de datos:

Capa:

Añadir archivo guardado al mapa

Aceptar Cancelar Ayuda

Fuente: elaboración propia.

Una vez guardados los archivos, en la carpeta seleccionada QGIS se creará un total de seis archivos, cada uno con un formato diferente (.CPG, .DBF, .PRJ, .QPJ,

.SHP, .SHX) y con el mismo nombre asignado, tal y como se muestra en la figura 29:

**Figura 29 – Archivos digitales creados por QGIS**

Nombre	Fecha de modifica...	Tipo	Tamaño
 2019_0123.cpg	09-12-2019 18:39	Archivo CPG	1 KB
 2019_0123	09-12-2019 18:39	Archivo DBF	19 KB
 2019_0123	09-12-2019 18:39	Archivo PRJ	1 KB
 2019_0123.qpj	09-12-2019 18:39	Archivo QPJ	1 KB
 2019_0123	09-12-2019 18:39	Adobe Acrobat Document	1 KB
 2019_0123	09-12-2019 18:39	DWG TrueView Compiled Shape	1 KB

Fuente: elaboración propia.

La figura anterior muestra los archivos creados por el programa QGIS, los cuales deberán ser entregados en formato digital a la autoridad. Independiente del *software* de sistema de información geográfica

utilizado para crear los archivos, se deberán entregar todos los archivos digitales creados al guardarlo en formato SHAPE dentro de la carpeta seleccionada.

## ANEXO 13 — RESUMEN DE VALORES POR DEFECTO PARA ESTA GUÍA

**Tabla 46 - Valor por defecto factor de emisión calefactor a leña.**

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

Fuente: elaboración propia a partir del documento *Propuesta de medidas para el uso eficiente de la leña en la Región Metropolitana* (CDT, 2012).

**Tabla 47 - Valor por defecto niveles de actividad calefactores a leña en la Región Metropolitana**

Región	Promedio h/año-equipo
Región Metropolitana	2.008

Fuente: elaboración propia a partir de la tabla 166 del documento *Medición del consumo nacional de leña y otros combustibles sólidos derivados de la madera* (CDT, 2015).

**Tabla 48 – Resumen factores de emisión por defecto para vehículos pesados<sup>23</sup>**

Tipo		MP2,5	NO <sub>x</sub>	NH <sub>3</sub>
Unidad	Tecnología	g/km	g/km	g/km
Nota		MP2,5 = MP10 = MPS	NO <sub>2</sub> equivalente	-
Diesel 7,5 - 16 t	Convencional	0,3344	8,92	0,0029
	EURO I - 91/542/EEC I	0,201	5,31	0,0029
	EURO II - 91/542/EEC II	0,104	5,50	0,0029
	EURO III - 2000	0,0881	4,30	0,0029
	EURO IV - 2005	0,0161	2,65	0,0029
	EURO V - 2008	0,0161	1,51	0,011
	EURO VI	0,0008	0,291	0,009
Diesel 16 - 32 t	Convencional	0,418	10,7	0,0029
	EURO I - 91/542/EEC I	0,297	7,52	0,0029
	EURO II - 91/542/EEC II	0,155	7,91	0,0029
	EURO III - 2000	0,13	6,27	0,0029
	EURO IV - 2005	0,0239	3,83	0,0029
	EURO V - 2008	0,0239	2,18	0,011
	EURO VI	0,0012	0,422	0,009
Diesel >32 t	Convencional	0,491	12,8	0,0029
	EURO I - 91/542/EEC I	0,358	9,04	0,0029
	EURO II - 91/542/EEC II	0,194	9,36	0,0029
	EURO III - 2000	0,151	7,43	0,0029
	EURO IV - 2005	0,0268	4,61	0,0029
	EURO V - 2008	0,0268	2,63	0,011
	EURO VI	0,0013	0,507	0,009

Fuente: elaboración propia a partir 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).

<sup>23</sup> Los factores se presentan con exactamente la misma cantidad de decimales que presenta la fuente.

**Tabla 49 – Resumen factores de emisión por defecto para buses<sup>24</sup>**

Tipo		MP2,5	NO <sub>x</sub>	NH <sub>3</sub>
Unidad	Tecnología	g/km	g/km	g/km
Nota		MP2,5 = MP10 = MPS	NO <sub>2</sub> equivalente	-
Buses urbanos estándar	Convencional	0,9090	16,500	0,0029
	EURO I - 91/542/EEC I	0,4790	10,100	0,0029
	EURO II - 91/542/EEC II	0,2200	10,700	0,0029
	EURO III - 2000	0,2070	9,380	0,0029
	EURO IV - 2005	0,0462	5,420	0,0029
	EURO V - 2008	0,0462	3,090	0,011
	EURO VI	0,0023	0,597	0,009
Buses interurbanos estándar	Convencional	0,4700	10,600	0,0029
	EURO I - 91/542/EEC I	0,3620	8,100	0,0029
	EURO II - 91/542/EEC II	0,1650	8,950	0,0029
	EURO III - 2000	0,1780	7,510	0,0029
	EURO IV - 2005	0,0354	4,510	0,0029
	EURO V - 2008	0,0354	2,570	0,011
	EURO VI	0,0018	0,496	0,009

Fuente: elaboración propia a partir de la 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).

<sup>24</sup> Los factores se presentan con exactamente la misma cantidad de decimales que presenta la fuente.

**Tabla 50 – Resumen valores por defecto factores de emisión calderas (kg/kg comb)<sup>25</sup>**

Combustible	MP2,5	MP10	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>
Gas natural, P > 29,31 MW	0,0001604	0,0001604	0,005909	0,0000126
Gas natural, P < 29,31 MW	0,0001604	0,0001604	0,00211	0,0000126
Petróleo N°6, P > 29,31 MW	0,001165*S+0,0004083	0,001165*S+0,0004083	0,00596	0,02*S
Petróleo N°6, P < 29,31 MW	0,001165*S+0,0004083	0,001165*S+0,0004083	0,006974	0,02*S
Petróleo N°5, P > 29,31 MW	0,001188*S+0,00004162	0,001188*S+0,00004162	0,0060753	0,02029*S
Petróleo N°5, P < 29,31 MW	0,001188*S+0,00004162	0,001188*S+0,00004162	0,0071094	0,02029*S
Diésel	0,0002853	0,0002853	0,003424	0,02026*S
Kerosene <sup>26</sup>	0,000036*S	0,00015	0,00148	0,02101
Carbón	0,00217724	0,0083461	0,009979	0,01724*S
Leña	0,001950187	0,00226473	0,003083	0,0001573
GLP butano	0,0001743	0,0001743	0,003268	0,000020*S
GLP propano	0,0001525	0,0001525	0,002832	0,000022*S

Fuente: elaboración propia a partir de la tabla 2-2 del *Manual para el desarrollo de inventarios de emisiones atmosféricas* (MMA, 2017).

<sup>25</sup> S: contenido de azufre del combustible (%\*100).

<sup>26</sup> Para el MP se considera el MP filtrable, de tamaño superior a 0,3 µm, se asume MP = MP10 = MP2,5.

**Tabla 51 – Valores por defecto eficiencias de remoción de tecnologías en calderas**

Equipo de control	Contaminante	Eficiencia típica
LNB ( <i>low NOx burner</i> )	NO <sub>x</sub>	47,5%
SNCR	NO <sub>x</sub>	45%
SCR	NO <sub>x</sub>	80%
LNB+SCR	NO <sub>x</sub>	91%
LNB+SNCR	NO <sub>x</sub>	69,50%
ESP ( <i>electrostatic precipitator</i> )	MP10	98%
ESP ( <i>electrostatic precipitator</i> )	MP2,5	95%
Filtro de mangas	MP10	99%
Filtro de mangas	MP2,5	99%
<i>Wet scrubber</i>	SO <sub>2</sub>	95%
FGD seco ( <i>flue gas desulfurization</i> )	SO <sub>2</sub>	90%
FGD húmedo	SO <sub>2</sub>	90%
Combustible bajo en S	SO <sub>2</sub>	75%

Fuente: elaboración propia a partir de la tabla 2-4 del *Manual para el desarrollo de inventarios de emisiones atmosféricas* (MMA, 2017).

## 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.
- 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](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](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. (2016). *Establece Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica para la Región Metropolitana de Santiago*. Santiago: 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.
- 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.
- 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.
- SMA. (2014). *Evaluación del instrumento de compensación de emisiones Región Metropolitana*. Santiago: División de Gestión e Innovación - Superintendencia de Medio Ambiente.
- 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.

## AGRADECIMIENTOS

Se extiende el agradecimiento por su tiempo y buena disposición a diversas personas y empresas que colaboraron ya sea de manera presencial o virtual, proponiendo y explicando alternativas de mecanismos de compensación de emisiones y también por compartir información e ideas constructivas que sirvieron para la elaboración de este documento:

- Robert Fraser y Nicolás Fraser, de la empresa Purexhaust.
- Gustavo Zamorano y Yocelyn Valdés, de la empresa FiltroVivo.
- Roberto Feliu y Pablo Contino, de la empresa Solvay.
- Eduardo Burboa, de la empresa MPZero.
- Sergio Rojas, de la empresa Abasterm.
- Alberto Piel y Marco Maureira, de la empresa Proterm.
- Catalina López y José Galaz, de la empresa CaTiO2.
- María de la Luz Barros, de la empresa VerdeActivo.
- Sergio Vera Araya, del Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción – Escuela de Ingeniería – Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Roberto Martínez González y Joyce Vera Bascour, del Ministerio del Medio Ambiente.

## ÍNDICE TABLAS

Tabla 1 – Emisión máxima proyectos dentro de la Región Metropolitana.....	8
Tabla 2 - Emisión equivalente MP2,5 por tonelada de contaminante .....	8
Tabla 3 – Antecedentes del titular.....	14
Tabla 4 – Antecedentes del representante legal.....	14
Tabla 5 – Resumen años a compensar emisiones por el proyecto .....	15
Tabla 6 – Resumen cumplimiento de criterios de medida de compensación .....	17
Tabla 7 – Ejemplo resumen de cálculos .....	19
Tabla 8 – División áreas territoriales en la Región Metropolitana .....	23
Tabla 9 – Resumen cumplimiento de criterios mecanismo de compensación: recambio de calefactores.....	25
Tabla 10 – Ventajas y desventajas mecanismo de compensación: recambio de calefactores.....	26
Tabla 11 - Valor por defecto factor de emisión calefactor a leña .....	27
Tabla 12 - Valor por defecto niveles de actividad calefactores a leña en la Región Metropolitana.....	28
Tabla 13 - Acreditación plan de seguimiento: recambio de calefactores .....	30
Tabla 14 – Resumen cumplimiento de criterios mecanismo de compensación: chatarrización de motores.....	33
Tabla 15 – Ventajas y desventajas mecanismo de compensación: chatarrización de motores.....	34
Tabla 16 – Resumen factores de emisión por defecto para vehículos pesados .....	35
Tabla 17 – Resumen factores de emisión por defecto para buses .....	36
Tabla 18 – Resumen niveles de actividad por defecto para niveles de actividad fuentes móviles.....	37
Tabla 19 - Acreditación plan de seguimiento: Chatarrización de motores. ....	39
Tabla 20 – Resumen cumplimiento de criterios mecanismo de compensación: filtros para fuentes fijas industriales y/o comerciales.....	42

Tabla 21 – Ventajas y desventajas mecanismo de compensación: filtros para fuentes fijas industriales y/o comerciales .....	43
Tabla 22 - Acreditación plan de seguimiento: Filtros para fuentes fijas comerciales o industriales.....	44
Tabla 23 – Resumen cumplimiento de criterios mecanismo de compensación: filtros DPF para fuentes móviles .....	48
Tabla 24 – Ventajas y desventajas mecanismo de compensación: filtros DPF para fuentes móviles.....	49
Tabla 25 - Acreditación plan de seguimiento: filtros DPF para fuentes móviles.....	51
Tabla 26 – Resumen cumplimiento de criterios mecanismo de compensación: implementación o regeneración de sistema SCR para fuentes móviles .....	57
Tabla 27 – Ventajas y desventajas mecanismo de compensación: regeneración de sistema SCR para fuentes móviles .....	58
Tabla 28 - Acreditación plan de seguimiento. Regeneración sistema SCR para fuentes móviles.....	60
Tabla 29 – Resumen cumplimiento de criterios mecanismo de compensación: mejoras tecnológicas para calderas.....	64
Tabla 30 – Ventajas y desventajas mecanismo de compensación: mejoras tecnológicas para calderas domiciliarias e industriales.....	65
Tabla 31 – Resumen valores por defecto factores de emisión calderas (kg/kg comb). .....	65
Tabla 32 – Valores por defecto eficiencias de remoción de tecnologías en calderas.	66
Tabla 33 - Acreditación plan de seguimiento: recambio o mejoras tecnológicas para calderas.....	67
Tabla 34 – Resumen cumplimiento de criterios mecanismo de compensación: techos y/o muros verdes.....	75
Tabla 35 – Ventajas y desventajas mecanismo de compensación: techos y muros verdes .....	76
Tabla 36 - Acreditación plan de seguimiento: techos verdes .....	79
Tabla 37 – Resumen cumplimiento de criterios mecanismo de compensación: pavimentación de calles .....	83

Tabla 38 – Ventajas y desventajas mecanismo de compensación: pavimentación de calles .....	84
Tabla 39 - Parámetros por defecto factores de emisión para resuspensión de MP10 por tránsito de vehículos en caminos no pavimentados y caminos pavimentados .....	85
Tabla 40 - Acreditación plan de seguimiento: pavimentación de calles .....	90
Tabla 41 – Resumen medición de flujo ejemplo aplicado .....	91
Tabla 42 – Resumen costo efectivo de mecanismos de compensación de emisiones	95
Tabla 43 – Resumen cumplimiento de criterios mecanismo de compensación .....	100
Tabla 44 - Acreditación plan de seguimiento .....	101
Tabla 45 - Información a incorporar en tabla de atributos del archivo SHAPE .....	102
Tabla 46 - Valor por defecto factor de emisión calefactor a leña. ....	116
Tabla 47 - Valor por defecto niveles de actividad calefactores a leña en la Región Metropolitana.....	116
Tabla 48 – Resumen factores de emisión por defecto para vehículos pesados .....	117
Tabla 49 – Resumen factores de emisión por defecto para buses .....	118
Tabla 50 – Resumen valores por defecto factores de emisión calderas (kg/kg comb) .....	119
Tabla 51 – Valores por defecto eficiencias de remoción de tecnologías en calderas	120

## ÍNDICE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama estructura guía de alternativas de compensación de emisiones para fuentes de combustión.....	11
Figura 2 – Diagrama estructura y contenidos mínimos para un PCE.....	13
Figura 3 – Ejemplo carta Gantt PCE .....	21
Figura 4 – División áreas territoriales en la Región Metropolitana.....	24
Figura 5 – Diagrama de funcionamiento de filtro DPF.....	46
Figura 6 – Diagrama de funcionamiento de sistema SCR.....	54
Figura 7 – Diagrama ejemplo SCR con urea en solución y en estado sólido .....	56
Figura 8 – Diagrama ejemplo de insumos de instalación de regeneración de sistema SCR.....	57
Figura 9 – Diagrama dimensiones beneficiadas y servicios ecosistémicos asociados a azoteas vivas, verdes y activas .....	70
Figura 10 – Ejemplo de implementación de techo verde, Centro Juvenil Gary Comer, Chicago, EE. UU.....	72
Figura 11 – Ejemplo de implementación de techo verde, Centro de Convenciones Javits, Nueva York, EE. UU.....	73
Figura 12 – Ejemplo de implementación de techo verde en Edificio Amapolas en Ñuñoa, Región Metropolitana .....	74
Figura 13 – Comparación de captura de MP2,5 en mono especie y mix para techos verdes .....	77
Figura 14 – Comparación de captura de MP2,5 en mono especie y mix para muros verdes .....	78
Figura 15 – Costos asociados a la compensación de 1 tonelada por año de contaminante para los mecanismos propuestos. ....	98
Figura 16 – Ejemplo llenado de datos archivo Excel.....	104
Figura 17 – Ejemplo para guardar archivo Excel en formato .csv.....	105
Figura 18 – Acceso a opción de ingreso de archivo en formato .csv a QGIS.....	106
Figura 19 –Menú para ingreso de archivo en formato .csv a QGIS.....	107
Figura 20 – Archivo .csv cargado en QGIS.....	107

Figura 21 –Asignación de campo X y campo Y para la georreferenciación en QGIS	108
Figura 22 – Ejemplo ingreso de archivo .csv a QGIS.....	109
Figura 23 – Ingreso a visualizar la tabla de atributos de un archivo en QGIS .....	109
Figura 24 – Ejemplo tabla de atributos archivo en formato .csv ingresado a QGIS..	110
Figura 25 – Ingreso a opción para guardar archivo en formato SHAPE en QGIS .....	111
Figura 26 – Ingreso a opción para guardar archivo en formato SHAPE en QGIS .....	112
Figura 27 - Ejemplo de nombre a asignar para SHAPE.....	113
Figura 28 – Archivo ingresado para guardado en formato SHAPE .....	114
Figura 29 – Archivos digitales creados por QGIS.....	115



**Guía de alternativas de  
compensación de emisiones  
para fuentes de combustión  
—61134-1-LE19—**