



**Universidad del Desarrollo**  
Facultad de Ingeniería

# EVALUACIÓN DEL EFECTO DE UNA NUEVA METODOLOGÍA DE CORRECCIÓN DE EMISIONES DE MATERIAL PARTICULADO

CLAUDIO MERIÑO NAVARRETE, LORENA TORRES KUNSTMANN

PROFESOR GUÍA: FERNANDO ROJAS, MPP  
LORENZO REYES BOZO, PhD

PROYECTO DE GRADO PRESENTADO A LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA  
UNIVERSIDAD DEL DESARROLLO PARA OPTAR AL GRADO ACADÉMICO DE  
MAGÍSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL Y DE SISTEMAS

CONCEPCIÓN – CHILE  
2020



**Universidad del Desarrollo**  
Facultad de Ingeniería

# EVALUACIÓN DEL EFECTO DE UNA NUEVA METODOLOGÍA DE CORRECCIÓN DE EMISIONES DE MATERIAL PARTICULADO

**POR: CLAUDIO MERIÑO NAVARRETE, LORENA  
TORRES KUNSTMANN**

Proyecto de Grado presentado a la Comisión integrada por los profesores:

**PROFESOR GUIA: FERNANDO ROJAS, MPP y LORENZO REYES  
BOZO, PhD**

**PROFESOR INTEGRANTE 1: HÉCTOR VÁLDES-GONZÁLEZ PhD**

**(PROFESOR INTEGRANTE 2: CRISTIÁN MEJÍAS CONTRERAS, MBA**

Para completar las exigencias del Grado de Magíster en Ingeniería Industrial y de Sistemas.

Diciembre, 2020  
Concepción, Chile

## DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD

Por medio de la presente, declaramos que el trabajo titulado: **EVALUACIÓN DEL EFECTO DE UNA NUEVA METODOLOGÍA DE CORRECCIÓN DE EMISIONES DE MATERIAL PARTICULADO**, que presentamos a la Universidad del Desarrollo de Chile, es de nuestra autoría y no ha sido publicado previamente, ni está siendo considerado para publicación bajo otra filiación. En igual sentido, declaramos que el trabajo de tesis y su contenido, son originales y que todos los datos y referencias a trabajos ya publicados con anterioridad han sido debidamente identificados, referenciados o citados en el documento, y que estas citas han sido incluidas en las referencias bibliográficas. Afirmo, asimismo, que los materiales presentados no se encuentran protegidos por derechos de autor; y en caso de que así lo estuvieran, me hago responsable de cualquier litigio o reclamo relacionado con la violación de derechos de propiedad intelectual, exonerando de toda responsabilidad a la Universidad del Desarrollo de Chile.

Finalmente, me comprometo a no someter este trabajo (o parte de este), a consideración en ninguna revista o congreso para publicación sin contar con la aprobación y haber pasado el debido proceso de revisión en Universidad del Desarrollo. En caso de que un artículo sea aprobado para su publicación, autorizamos a la Universidad del Desarrollo a incluir dicho artículo en sus revistas, y a reproducirlo, editarlo, distribuirlo, exhibirlo y comunicarlo en el país y en el extranjero, por medios impresos, electrónicos, Internet o cualquier otro medio, para propósitos científicos y sin fines de lucro.



**Claudio Meriño Navarrete,**

Firma



**Lorena Torres Kunstmann**

Firma

*Dedico este trabajo a mi familia y los resultados a mis hijos, quienes tendrán en sus manos la tarea de continuar contribuyendo a la calidad del aire de nuestro planeta.*

*Claudio Meriño Navarrete.*

*Quiero agradecer a mi familia...por haberme apoyado en culminar mis estudios y demostrar que con dedicación y esfuerzo todo es posible.*

*Lorena Torres Kunstmann*

## **AGRADECIMIENTOS**

Le agradezco a mi familia y su incansable pregunta sobre si termine o no el magister y en especial a Elizabeth, mi esposa, quien ha sido clave en el proceso de cerrar esta importante etapa en mi carrera profesional, siempre presente, siempre a mi lado.

A mis hijos, los mejores del mundo y quienes tendrán mucho que aportar para un mejor futuro aquí en nuestra casa.

A Héctor Valdés González y Lorenzo Reyes Bozo, por el apoyo, disposición y asistencia para mejorar cada etapa de este trabajo, logrando obtener conclusiones que seguramente darán que hablar en materia ambiental.

Claudio Meriño Navarrete

## **AGRADECIMIENTOS**

Este proyecto de tesis marca la culminación de un largo camino que comencé a recorrer hace varios años, el cual fue muy enriquecedor, de mucho crecimiento personal y profesional. Es por esto que quiero agradecer a los profesores que durante este tiempo me entregaron herramientas para desarrollarme mejor en el ámbito profesional, que siempre estuvieron atentos a mis consulta y duda con una excelente disposición a enseñar, a mis compañeros que hicieron entretenido este camino, en especial a mi grupo de estudio, al director del magister Sr. Héctor Valdés Gonzalez que sin su ayuda no podría haber terminado.

Agradecer a mi familia por estar siempre a mi lado, disfrutando mis éxitos y apoyándome en este desafío, principalmente a mi esposo Álvaro que sin él no hubiese podido alcanzar mis objetivos, a mis hijos Renato, Martín y Gaspar que son los pilares fundamentales en mi vida, que son mi inspiración diaria, quiero agradecerles la paciencia que han tenido, por creer siempre e incondicionalmente que iba a alcanzar mis objetivos.

A mis padres que siempre fomentaron el estudio permanente para el crecimiento personal y profesional, por apoyarme siempre.

A mi compañero de tesis Claudio, por compartir sus conocimiento y tema para lograr nuestros objetivos.

*Lorena Torres Kunstmann*

# EVALUACIÓN DEL EFECTO DE UNA NUEVA METODOLOGÍA DE CORRECCIÓN DE EMISIONES DE MATERIAL PARTICULADO

Claudio Meriño Navarrete, Lorena Torres Kunstmann

Bajo la supervisión del Profesor Lorenzo Reyes Bozo en la Universidad del Desarrollo de Chile

## *Resumen*

Este trabajo presenta un análisis comparativo sobre el nivel de emisiones de material particulado muestreado en chimenea. Las emisiones de material particulado se han medido siguiendo el método para determinación de las emisiones de partículas desde fuentes estacionarias, sin embargo, el nuevo plan de descontaminación de Concepción Metropolitano requiere que estas emisiones sean corregidas por oxígeno en reemplazo de la corrección por exceso de aire indicada por el método de referencia. El objetivo de esta investigación es evaluar el efecto sobre el nivel de emisiones de material particulado, bajo la nueva metodología de corrección por oxígeno y como este cambio impactara en las operaciones de las fuentes fijas que deban cumplir con el plan. Para lograrlo se propone una metodología cuantitativa, donde se evaluaron 9 informes oficiales de muestreos isocinéticos, realizando el cálculo de la concentración de material particulado corregida por exceso de aire y luego corregida por el factor de oxígeno, estableciendo el aumento de emisiones de material particulado, bajo la nueva metodología. Los datos muestran que, la nueva metodología corregida por oxígeno incrementa la concentración de emisiones hasta un 80% promedio, lo cual, dejaría fuera de cumplimiento del límite de emisión establecido por el nuevo plan de descontaminación que establece un límite de 50 y 100 mg/m<sup>3</sup>N. Se concluye que la aplicación de la nueva metodología de corrección aumenta de manera significativa la concentración de dichas emisiones de las fuentes fijas, haciendo imperativo que estas fuentes de emisión sean reguladas previamente estableciendo la mejor relación de gases de combustión, logrando cumplir con el límite emisión y optimizar el uso de combustible. Estudios futuros deben evaluar en detalle las relaciones óptimas de combustión, cambio tecnológico y las prácticas de mantenimiento que permitan los mejores resultados productivos y socioambientales.

**Palabras claves:** Normas de emisión, muestreos isocinéticos, gases de la combustión, fuentes fijas, plan de descontaminación ambiental.

# ÍNDICE GENERAL

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>11</b>
1.1	RELEVANCIA DEL CAMBIO METODOLÓGICO EN LA CORRECCIÓN DE EMISIONES DE MP .....	14
1.2	BREVE DISCUSIÓN DE LA LITERATURA .....	15
1.3	CONTRIBUCIÓN DEL TRABAJO .....	17
1.4	OBJETIVO GENERAL .....	18
1.4.1	<i>Objetivos específicos</i> .....	18
1.5	PROPUESTA METODOLÓGICA .....	19
1.6	ORGANIZACIÓN Y PRESENTACIÓN DE ESTE TRABAJO .....	21
<b>2</b>	<b>PRESENTACIÓN DEL PROBLEMA Y METODOLOGÍA SELECCIONADA .....</b>	<b>23</b>
2.1	PRESENTACIÓN DE LA PROBLEMÁTICA DEL PROYECTO .....	24
2.2	METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE MUESTREOS ISOCINÉTICOS DE MATERIAL PARTICULADO Y GASES DE COMBUSTIÓN.....	25
2.3	COMPARAR LAS CONCENTRACIONES DE EMISIÓN CORREGIDAS POR OXÍGENO Y POR EXCESO DE AIRE CON LOS LÍMITES DE EMISIÓN DE MATERIAL PARTICULADO ESTABLECIDOS POR EL PPDA .....	26
2.4	EVALUAR EL IMPACTO SOBRE LAS FUENTES FIJAS QUE OPERAN FUERA DE LOS PARÁMETROS DE COMBUSTIÓN IDEALES. ....	28
2.5	CONCLUSIÓN Y ANÁLISIS DEL CAPÍTULO .....	28
<b>3</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>29</b>
3.1	ANÁLISIS DE MUESTREOS ISOCINÉTICOS DE MATERIAL PARTICULADO Y GASES DE COMBUSTIÓN.....	29
3.1.1	TIPOS DE FUENTES FIJAS Y COMBUSTIBLES UTILIZADOS. ....	29
	<b>LOS DATOS DE MUESTREOS ISOCINÉTICOS DISPONIBLES CORRESPONDEN A 8 CALDERAS DE CALEFACCIÓN Y AGUA CALIENTE, CUYO RANGO DE POTENCIA TÉRMICA ESTA ENTRE LOS 0.2 Y 0.5 MWT, (MEGA WATT TÉRMICOS) SIENDO LOS CONSUMOS DE COMBUSTIBLE NOMINALES DECLARADOS Y REPORTADOS EN SUS INFORMES DE REVISIÓN Y PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO SE ENCUENTRAN EN RANGOS DE 50 A 100 KG/HORA DE CONSUMO.....</b>	<b>29</b>
3.1.2	PARÁMETROS DE GASES Y EMISIONES PROMEDIOS DE LAS FUENTES. ....	29
3.2	COMPARACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES DE EMISIÓN CORREGIDAS POR OXÍGENO Y POR EXCESO DE AIRE CON LOS LÍMITES DE EMISIÓN DE MATERIAL PARTICULADO ESTABLECIDOS POR EL PPDA .....	31
3.3	EVALUACIÓN DEL IMPACTO SOBRE LAS FUENTES FIJAS REGULADAS Y QUE OPERAN FUERA DE LOS PARÁMETROS DE COMBUSTIÓN IDEALES. ....	32
3.3.1	CUMPLIMIENTO DEL LÍMITE DE EMISIÓN DEL PLAN DE DESCONTAMINACIÓN DE CONCEPCIÓN.....	32
3.3.2	EFECTO SOBRE LA CALIDAD DEL AIRE EN TÉRMINOS DE EMISIÓN DE MP <sub>10</sub> Y MP <sub>2.5</sub> . ....	34
3.4	CRITERIO DE CORRECCIÓN POR OXÍGENO EN OTRAS REGIONES.....	40

3.5	CONCLUSIÓN Y ANÁLISIS DEL CAPÍTULO .....	41
<b>4</b>	<b>CONCLUSIONES GENERALES .....</b>	<b>43</b>
<b>5</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>45</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: LÍMITE MÁXIMO DE EMISIÓN DE MP PARA FUENTES ESTACIONARIAS. ....	11
TABLA 2: CORRECCIÓN POR EA Y OXÍGENO MP MEDIDO EN CHIMENEA .....	12
TABLA 3: FACTORES DE CORRECCIÓN PARA EXCESO DE AIRE Y OXÍGENO .....	24
TABLA 4: RESUMEN DE PARÁMETROS DE MUESTREOS ISOCINÉTICOS UTILIZADOS .....	25
<b>TABLA 5.</b> RESUMEN DE RESULTADOS DE MUESTREO ISOCINÉTICOS. ....	29
TABLA 6: DISTRIBUCIÓN DE EMISIONES Y CONTAMINANTES TOTAL FUENTES FIJAS. ....	37
TABLA 7: CUMPLIMIENTO DE CONCENTRACIONES PARA MP <sub>10</sub> Y MP <sub>2.5</sub> DIARIO Y ANUAL .....	38

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. PARÁMETROS DE COMBUSTIÓN Y CONCENTRACIÓN DE EMISIONES.....	30
FIGURA 2. RELACIÓN EMISIÓN DE CO EN UNA COMBUSTIÓN CON MAYOR EA .....	31
FIGURA 3. CONCENTRACIÓN MEDIDA V/S LAS CORREGIDAS POR EA Y OXIGENO .....	32
FIGURA 4. CONCENTRACIONES CORREGIDAS POR EA Y OXIGENO V/S CUMPLIMIENTO DEL LÍMITE DE EMISIÓN. ....	33
FIGURA 5. CONCENTRACIÓN POR EA Y CUMPLIMIENTO DEL LÍMITE DE EMISIÓN. ....	34
FIGURA 6. ROSA DE VIENTO Y DISTRIBUCIÓN PARA VERANO.....	35
FIGURA 7. ROSA DE VIENTO Y DISTRIBUCIÓN PARA OTOÑO.....	35
FIGURA 8. ROSA DE VIENTO Y DISTRIBUCIÓN PARA INVIERNO.....	35
FIGURA 9. ROSA DE VIENTO Y DISTRIBUCIÓN PARA PRIMAVERA.....	36
FIGURA 10. DISTRIBUCIÓN DE VIENTOS Y RECEPTORES A 100 Y 1000 METROS DE LA FUENTE.....	36
FIGURA 11: RESULTADO MODELACIÓN MP <sub>10</sub> CORREGIDO POR OXIGENO .....	38
FIGURA 12: RESULTADO MODELACIÓN MP <sub>10</sub> CORREGIDO POR EXCESO DE AIRE.....	39
FIGURA 13: RESULTADO MODELACIÓN MP <sub>2.5</sub> CORREGIDO POR OXIGENO .....	39
FIGURA 14: RESULTADO MODELACIÓN MP <sub>2.5</sub> CORREGIDO POR EXCESO DE AIRE .....	40

## ÍNDICE DE ECUACIONES

ECUACIÓN 1: CORRECCIÓN DE EMISIONES POR EXCESO DE AIRE (EA)	20
ECUACIÓN 2: CORRECCIÓN DE EMISIONES POR OXIGENO	21

## 1 INTRODUCCIÓN

Concepción Metropolitano fue declarado zona latente por material particulado respirable (MP<sub>10</sub>) por el DS 41 en el año 2006 y posteriormente se declara zona saturada por material particulado fino (MP<sub>2.5</sub>) por el DS 15 del año 2015, siendo el espíritu de estas normativas establecer un control sobre las emisiones y su impacto sobre la salud de población.

En diciembre de 2019 y derivado de las normativas anteriormente citadas, el Ministerio del Medio Ambiente de Chile, publica el plan de prevención y descontaminación atmosférica (PPDA) para las comunas de Concepción Metropolitano bajo el Decreto supremo (DS) N° 6/2018, el cual establece los límites de emisión de material particulado (MP) y gases, para las principales fuentes de emisión identificadas en la zona.

De acuerdo con esta normativa, las fuentes fijas denominadas calderas y hornos (vidrio, cemento y cal), deberán dar cumplimiento a un límite máximo de emisión de material particulado, de acuerdo con la Tabla 1:

**Tabla 1:** Límite máximo de emisión de MP para fuentes estacionarias.

Tipo de fuente estacionaria	Potencia térmica	Tipo de combustible	Límite máximo de emisión de MP (mg/m <sup>3</sup> N)	
			Fuentes existentes	Fuentes Nuevas
Calderas	Mayor a 75 kWt y menor o igual a 1 MWt	Sólido	100	50
		Líquido o gaseoso	No aplica	No aplica
	Mayor a 1 MWt y menor 20 MWt	Todos	50	30
	Mayor a 20 MWt	Todos	30	20

Fuente: PPDA, DS N° 6/2018. Capítulo iv. Fuentes estacionarias Tabla N°18. Límite máximo de emisión de MP

El cumplimiento de este límite de emisión está condicionado a la ejecución de un muestreo isocinético de material particulado, cuya concentración medida debe ser corregida por un factor de oxígeno establecido de acuerdo con el estado físico del combustible utilizado por las fuentes de emisión. (ver tabla 2).

Esta metodología de corrección viene en reemplazo a lo indicado por el método CH-5 del Instituto de Salud Pública de Chile (ISP) y derivado del método oficial Norte Americano US EPA 3B y EPA 5, que regula el procedimiento de muestreo isocinético, donde se establece la corrección por exceso de aire (EA) para cada combustible.

**Tabla 2:** Corrección por EA y oxígeno MP medido en chimenea

Combustibles	Corrección por exceso de aire EA Método CH-5 oficial (%)	Corrección por oxígeno, método exigido por el PPDA (%)
Petróleo diésel	20	3
Leña en trozos	150	6
Gas Natural / GLP	10	3

Fuente: Elaboración propia datos PPDA, DS N° 6/2018 y método CH-5 ISP

Al aplicar las ecuaciones asociadas a cada metodología de corrección (ver ecuación 1), se obtiene un factor de corrección ( $F_o$ ) que para el caso del exceso de aire aumenta la emisión medida de material particulado en un 20% y al corregir por oxígeno, la emisión de material particulado medida aumenta en un 80% promedio.

**Ecuación 1:** Ecuaciones para corrección por EA y oxígeno.

$$C_{\text{corregida EA}} = C_{\text{medida}} \times \left( \frac{EA_{\text{medido}} + 100}{(EA_{\text{maximo}} + 100)} \right)$$

$$C_{\text{corregida O}_2} = C_{\text{medida}} \times \left( \frac{20.9 - C_{\text{referencia O}_2}}{(20.9 - C_{\text{medida O}_2})} \right)$$

Esta nueva metodología de corrección presenta una problemática importante con respecto a la antigua corrección por exceso de aire, siendo esta mucho más rigurosa que la oficial establecida por el ISP, aumentando el nivel de emisiones de MP por el solo hecho de mantener una combustión con un nivel de oxígeno superior al oxígeno de corrección, lo cual puede dejar fuera de cumplimiento del límite de emisión requerido por el PPDA, derivando en inversiones de abatimiento o inclusive cambio de la matriz energética.

En el siguiente trabajo, se analizaron los efectos de este cambio metodológico sobre una serie de calderas que utilizan como combustible principal la leña en trozos, donde se realizaron muestreos isocinéticos en diferentes condiciones de operación y concentración de gases de combustión, para concluir con los efectos normativos asociados al aumento de la concentración de emisiones sobre este tipo de fuentes, demostrando que las fuentes medidas quedan fuera de cumplimiento de los límites de emisión, obligándolos a paralizar en situaciones de emergencia o preemergencia ambiental, reducir emisiones mediante implementación de tecnologías de abatimiento o cambiar su matriz energética a un combustible más limpio.

Si bien esta nueva restricción a combustibles sólidos es necesaria en términos de salud y compromisos ambientales, se debe considerar la factibilidad de disponer de las condiciones y acceso a nuevos combustibles, como así también la capacidad económica para el cambio.

## **1.1 Relevancia del cambio metodológico en la corrección de emisiones de MP**

La metodología de corrección de emisiones para el MP, cumple un rol fundamental al momento de la entrega de un resultado de concentración de emisiones de MP muestreado en chimenea, lo cual tiene por objeto eliminar la dilución que pudiese existir en el caudal de gases que transporta el MP.

Lo anterior nos lleva al siguiente cuestionamiento ¿Cuál es el impacto sobre un combustible y fuente fija al modificar la metodología de corrección de emisiones de material particulado?

Entendiendo lo anterior, podemos establecer que este cambio metodológico implementado en los planes de descontaminación tiene por objeto desplazar el uso de combustibles sólidos a combustibles más limpios, como los gaseoso, optimizar los procesos de combustión o incorporar tecnologías de abatimiento que en conjunto permitan mejorar la calidad del aire de las localidades sujetas a este tipo planes.

## 1.2 Breve discusión de la literatura

El muestreo isocinético de material particulado corresponde a la metodología oficial para la determinación de partículas de MP desde una chimenea, siendo está autorizada por la Superintendencia del Medio Ambiente de Chile (SMA-Res128, 2019) y exigida mediante la aplicación del método oficial CH-5 del ISP (ISPCH, 2012); (MMA-DS6, 2019).

En el material particulado, se encuentra contenido el MP<sub>10</sub> y MP<sub>2.5</sub>, (EPA-US, 2020) los cuales han declarado zona latente o saturada a las ciudades que hoy cuentan con un plan de descontaminación atmosférico y en específico a la ciudad de Concepción. (MMA-D15, 2015); (MMA-D41, 2016)

La concentración de estos contaminantes en el aire, sobrepasan considerablemente los estándares de la Organización Mundial de la Salud (OMS, Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, 2006) y presentan sinergia con las hospitalizaciones por enfermedades respiratorias durante el invierno (Matus & Oyarzun, 2019), como así también los estudios históricos muestran que incrementos del material particulado presentan un efecto en la mortalidad de niños y ancianos (Conibear & Butt, 2018); (Vargas, 2011); (Barrios & Peña, 2004), situación que se ha visto acentuada en el sur de Chile, donde se estima que el 90% de la emisión de MP<sub>2.5</sub> proviene de la combustión de leña (Pais-Circular, 2020), frente a este escenario, la OMS, indica que si la concentración de MP<sub>10</sub> en el aire se reduce de 70 a 20 microgramos por metro cúbico ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) es posible reducir en un 15% la mortalidad relacionada con la contaminación del aire. (OMS, Air quality and health, 2018)

Las emisiones de estos contaminantes, se acentúan dependiendo del tipo de combustible como así también las consecuencias sobre la salud (WHO, 2006), donde un combustible gaseosos presenta las más bajas concentraciones de emisión de MP, respecto de sus pares líquidos y sólidos (MMA, 2019), siendo eximido de cumplir con los límites de emisión en la totalidad de planes de descontaminación atmosférica a nivel nacional en calderas de potencia térmica menores a 1 mega watt térmico (MWt) (MMA-PPDA, 2020), sin embargo el uso de leña, ha sido exigido a una serie de regulaciones de humedad, certificación y proyectado a prohibición de su uso mediante ley actualmente en discusión, representando un 64 % de las emisiones de MP<sub>2.5</sub>, un 78 % de las emisiones de SO<sub>2</sub> y un 67 % de las emisiones de NO<sub>x</sub> incluyendo a otros combustibles sólidos y líquidos (Mardones & Fuentes, 2017)

En el contexto anterior, esta nueva metodología de corrección de emisiones medidas en chimenea, se transforma en una nueva restricción al uso de leña, provocando que su emisión corregida por el 6% de oxígeno (MMA-DS6, 2019) incremente su nivel de emisiones, sobrepasando los límites de emisiones establecidos en la mayoría de los planes de descontaminación, impulsando así las opciones de cambio de matriz energética por un combustible más limpio (Rojas & Pacsi, 2019); (Mardones & Fuentes, 2017), o la implementación e planes de mantenimiento que optimicen la combustión con relaciones estequiométricas bien definidas y logrando una carga ambiental mínima reduciendo inquemados y emisión de MP (TESTO, 2018).

Esta metodología de corrección, es adoptada por México, la cual en su norma de emisión de material particulado y gases publicada en el año 2010, aplica una corrección del 5% de oxígeno para todos los combustibles empleados y sus mezclas (SEMARNAT, 2011), mientras que Estados Unidos y Colombia mantienen homologadas las metodologías de corrección por exceso de aire oficializadas por la agencia de protección ambiental US EPA (METHOD-EPA, 2017); (IDEAM, 2010)

Si bien esta acción metodológica puede tener su origen en alcanzar los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) para 2030, derivado de un esfuerzo conjunto de la División de Estadística de las Naciones Unidas (ONU-UNSD), el Banco Mundial, la Organización Mundial de la Salud (OMS), la Agencia Internacional de Energía (AIE) y la Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA), se deben considerar los plazos, disponibilidad de una matriz energética más limpia y el costo del cambio para las fuentes reguladas y sus usuarios, en consideración de que el último reporte de ODS indica que el mundo no está en camino de lograr los objetivos 2030. (WBank, 2018)

En el contexto anterior, el presente trabajo evalúa el efecto sobre el nivel de emisiones de material particulado medido en chimenea, bajo la nueva metodología de corrección por oxígeno, para determinar el aumento de estas emisiones y como impactarán en las operaciones de las fuentes fijas que operan fuera de los parámetros óptimos de combustión.

### **1.3 Contribución del trabajo**

Revisada la bibliografía disponible y las metodologías de corrección aplicadas, se establece como motivación de este trabajo, la tendencia a restringir y eliminar el uso del combustible leña, el cual, si bien representa gran parte de la contaminación ambiental conocida en el sur de Chile, representa una importante actividad económica local y de preferencia por su costo y accesibilidad.

Por esto, se propone una oportunidad para los regulados sobre los buenos resultados de mantener parámetros de combustión ideales en fuentes fijas reguladas, obteniendo beneficios ambientales en términos de reducción de emisiones atmosféricas como así también optimizar el uso de combustible.

En ese contexto, se busca contribuir con los regulados en términos sociales, ambientales y económicos ya sea reduciendo el riesgo de paralizar en situaciones de preemergencia o emergencia ambiental, cambiar la matriz energética a una más limpia y costosa o la implementación de sistemas de abatimiento para combustibles este tipo de combustibles y en términos de eficiencia reducir de manera importante el costo de producir la energía, de la mano de la optimización del combustible empleado.

#### **1.4 Objetivo general**

Evaluación del efecto de una nueva metodología de corrección de emisiones de material particulado para determinar cómo estos resultados impactarán en las operaciones de las fuentes fijas.

##### **1.4.1 Objetivos específicos**

- Analizar los resultados de 8 muestreos isocinético de material particulado y gases de combustión.
- Comparar las concentraciones de emisión corregidas por oxígeno y por exceso de aire con los límites de emisión de material particulado establecidos por el PPDA y norma de calidad del aire.
- Evaluar el impacto sobre las fuentes fijas que operan fuera de los parámetros de combustión ideales.

## 1.5 Propuesta metodológica

La metodología aplicada para la presente evaluación se basa en validar el aumento de emisiones atmosféricas derivada del cambio de metodología de corrección de las emisiones medidas. Este proceso se realiza aplicando ambas ecuaciones de corrección por exceso de aire y por oxígeno sobre el MP medido, para posteriormente definir como las variables de los gases de combustión contribuyen en aumento o disminución de las emisiones.

- 1) **Paradigma y Diseño:** Este trabajo propone una metodología de evaluación cuantitativa, basada en el análisis de los parámetros de muestreos oficiales y recalculando la concentración medida de MP mediante el método original que establece este proceso mediante exceso de aire, realizando esto al universo de 8 calderas operadas con combustible leña. La problemática para abordar impacta notoriamente a las fuentes fijas que usan la leña como combustible, siendo este el combustible preferido por precio y disponibilidad por gran parte de las empresas del sur de Chile, obligándolas a reevaluar su negocio o invertir en controles adicionales para dar cumplimiento a los nuevos requisitos legales en materia de emisiones.
- 2) **Datos sobre la que se efectuará el estudio.** La data que soporta los resultados de este trabajo tiene su origen en los parámetros oficiales reportados en muestreos isocinéticos, como material particulado medido, concentraciones de gases de combustión (monóxido de carbono, dióxido de carbono, oxígeno, exceso de aire) realizados sobre una muestra de 8 calderas de calefacción y agua caliente, con rangos de potencia térmica entre 0.2 a 0.5 MWt y cuyo combustible de uso exclusivo y parmente es la leña en trozos, el cual corresponde al combustible más usado al sur de Chile.

- 3) **Entorno:** El origen de los datos a analizar, corresponden a calderas ubicadas en diversas comunas de la región del Biobío, Ñuble y Los Lagos, sin embargo, todas estas serán posicionadas de forma hipotética en el aeropuerto de Carriel Sur, de tal manera de poder simular el efecto en el aumento de emisiones en términos de concentración de emisiones y su efecto sobre la calidad del aire.
  
- 4) **Intervenciones:** En este estudio se realizaron correcciones altitud y presión barométrica para los informes de origen Ñuble y Los Lagos, como así también el recalcu de las concentraciones de MP, comparando los resultados corregidos por oxígeno y posteriormente por la metodología de origen que indica correcciones por exceso de aire.

**Plan de análisis de los datos:** Las emisiones de material particulado medidas, reportadas por los informes de muestreo, se presentan corregidas por oxígeno y exceso de aire aplicando las ecuaciones citadas y establecidas por normativas de referencia 322/1990 y resolución 955/2016. (MINSAL, 2002); (MMA-SMA, 2016)

Por otra parte, se analiza respecto de los gases de combustión, como este incremento está relacionado con la concentración de oxígeno medido y las emisiones de monóxido de carbono, definiendo que en una mejor relación de combustión (con baja emisión de monóxido de carbono o combustión completa) se reduce la concentración de emisiones de MP medido y corregido.

Estos resultados son posteriormente comparados con las normas de emisión establecidas en el plan de descontaminación ambiental de referencia.

5) **Ética:** El presente trabajo se origina en apoyo al espíritu de la normativa de carácter atmosférica y bajo la premisa de la protección de la vida y salud de la población establecida en la ley. El resultado de esta evaluación, si bien “castiga” matemáticamente a un rubro y su combustible, tiene una derivada social y de salud que la respalda profundamente. Señalar que los datos utilizados en el presente trabajo no fueron manipulados y se procesaron en función de los resultados reportados a la autoridad.

## **1.6 Organización y presentación de este trabajo**

Capítulo 1: El presente proyecto comprende establecer el efecto sobre el nivel de emisiones de material particulado, respecto de una corrección por oxígeno y como este cambio impacta en las operaciones de las fuentes fijas que deban cumplir con un determinado nivel de emisiones.

Capítulo 2: Proponemos una evaluación de 8 informes oficiales de muestreos isocinéticos, donde realizaremos el cálculo de la concentración de material particulado corregida por exceso de aire y luego corregida por el factor de oxígeno que establece el PPDA, estableciendo el nivel de aumento de emisiones de material particulado, bajo la implementación de la nueva metodología.

Capítulo 3: Los resultados muestran que, para el nuevo método de corrección de emisiones por oxígeno, presentan un aumento en la concentración de emisiones de hasta un 80% promedio, lo cual deja fuera de cumplimiento del límite de emisión establecido por el PPDA a todas las fuentes fijas evaluadas.

Capítulo 4: Finalmente en las conclusiones, se determina que la nueva metodología de corrección de material particulado por oxígeno aumenta significativamente el nivel de emisiones de las fuentes fijas, haciendo

imperativo que estas cuenten con un plan de regulación de gases de combustión, logrando disminuir el nivel de emisiones y además optimizar el uso de combustible, implementar control de emisiones o derechamente cambiar su matriz energética a un combustible más limpio.

## **2 PRESENTACIÓN DEL PROBLEMA Y METODOLOGÍA SELECCIONADA**

En el presente capítulo, se detalla la problemática asociada al cambio metodológico establecido en el plan de descontaminación de Concepción para corregir las emisiones de material particulado medidas en chimenea y la metodología aplicada para determinar de forma cuantitativa el impacto sobre el aumento de emisiones de material particulado, sobre las fuentes fijas reguladas.

Como presentación de la problemática, se ha hecho referencia a las normativas involucradas en la definición de las metodologías y los parámetros de exceso de aire, establecidos en el decreto supremo 322/1991 y en el decreto supremo 146/2002 y las correcciones por oxígeno establecidos por el plan de descontaminación de Concepción.

En este contexto, la corrección por oxígeno presenta un aumento significativo en las emisiones de material particulado, debido a que el factor de corrección demanda una regulación rigurosa de la combustión, manteniendo la operación del equipo en un rango óptimo de oxígeno cuyo umbral es más bajo respecto de la antigua metodología de corrección por exceso de aire.

Esto conlleva a que las fuentes reguladas, por una parte, no cumplan los límites de emisión establecidos y para efectos de calidad del aire, incrementen el nivel de emisiones para futuros análisis de impacto sobre salud de la población.

En el contexto metodológico, se detallan las actividades para lograr dar cumplimiento a los objetivos específicos, considerando un análisis cuantitativo sobre los resultados de los muestreos isocinéticos oficiales de material particulado y gases de combustión disponibles para el estudio, donde se analizan resultados provenientes de fuentes fijas del tipo calderas y con consumo de combustible leña. Esta matriz de datos permitió la determinación de las concentraciones de emisión corregidas por oxígeno y por exceso de aire mediante la aplicación de las ecuaciones

de corrección para cada caso, permitiendo por último establecer una comparación de las concentraciones con los límites de emisión de material particulado establecidos por el PPDA y normas de calidad del aire.

En este último punto, se definió el impacto del cambio metodológico en término de emisiones como concentración emisiones para el cumplimiento de la normativa de fuentes fijas y además el cumplimiento de las normas de calidad del aire.

## 2.1 Presentación de la problemática del proyecto

En la actualidad, el método autorizado y vigente para la determinación de emisiones de fuentes estacionarias corresponde al método CH-5 de 2012 del Instituto de Salud Pública de Chile (ISP), el cual deriva del método norteamericano US EPA 5. Esta metodología indica que las emisiones medidas en chimenea deben ser corregidas por el exceso de aire (EA) máximo regulado para cada tipo combustible.

Sin embargo, el plan de descontaminación de Concepción Metropolitano, indica que la corrección del material particulado medido en chimeneas debe realizarse en función de un porcentaje de oxígeno establecido para los combustibles a su estado sólido, líquido o gaseoso (Tabla 3).

**Tabla 3:** Factores de corrección para exceso de aire y oxígeno

Combustibles	EA Máximo de corrección (%)	O2 de corrección (%)
Fuel Oil 2 (Diesel grados A1 y A2)	20	3
Fuel Oil 5	40	3
Fuel Oil 6	50	3
Carbón sobre parilla	100	6
Carbón pulverizado	50	6
Leña trozos y astillas	150	6
Gas licuado	10	3

Fuente: Elaboración propia, recopilación de datos DS 322, DS 146 y PPDA DS 6

De acuerdo con este cambio metodológico y las variables asociadas a corrección, encontramos que el efecto en el nuevo cálculo de las emisiones corregidas por

oxígeno incrementa de forma importante el nivel de emisiones de material particulado, dejando en muchos casos en incumplimiento de los límites de emisión establecidos por el plan de descontaminación atmosférico.

## 2.2 Metodología para el análisis de muestreos isocinéticos de material particulado y gases de combustión.

Esta primera etapa comprende el análisis de 8 muestreos oficiales de material particulado, pertenecientes a fuentes fijas del tipo calderas y cuyo combustible principal y exclusivo es leña en trozos.

El proceso comienza con la revisión de los informes y si estos cumplen con los parámetros de validación oficial, como estar en rango de isocinetismo, ejecución de pruebas de terreno y si los resultados de concentración están dentro de los parámetros de aceptabilidad y desviación estándar indicadas por el método.

Validado lo anterior, se realizó el rescate de los parámetros de combustión y resultados de emisión de material particulado medido y corregido por exceso de oxígeno de acuerdo con la aplicación del plan de descontaminación.

Estos datos son ordenados en una planilla excel (Tabla 4), para posteriormente realizar los cálculos de concentración de emisiones corregidas por exceso de aire.

**Tabla 4:** Resumen de parámetros de muestreos isocinéticos utilizados

Resultados Muestreo Isocinético 1	Unidad	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Promedio
Concentración medida	mg/m <sup>3</sup> N	26.4	34.9	35.7	32.3
Concentración corregida	mg/m <sup>3</sup> N	40.0	51.3	52.4	47.9
Caudal de gases corregido por O <sub>2</sub>	m <sup>3</sup> N/h	1424.0	1778.0	1459.0	1553.7
O <sub>2</sub>	%	14.4	14.2	14.4	14.3
CO <sub>2</sub>	%	6.3	6.0	6.3	6.2
CO	ppm	2455.0	2965.0	3065.0	2828.3
Exceso de aire	%	218.0	209.0	218.0	215.0

Fuente: Elaboración propia a partir de informes oficiales de muestreo isocinético

### 2.3 Comparar las concentraciones de emisión corregidas por oxígeno y por exceso de aire con los límites de emisión de material particulado establecidos por el PPDA

Una vez obtenidos los datos objetivos desde los muestreos oficiales, estos serán aplicados en las ecuaciones de corrección, determinando los  $F_0$  (Factor de combustible), aplicables para corregir las emisiones medidas en cada informe oficial de muestreo.

La ecuación empleada para la corrección por exceso de aire corresponde a la establecida en el método para la determinación de emisiones de material particulado proveniente de fuentes estacionarias del ISP y definida por el decreto 322/1990 que indicia en el numeral 2, que las concentraciones de aquellas fuentes emisoras de material particulado, que presenten excesos de aire superiores a los indicados en la Tabla N°3, deberán corregirse de acuerdo con la siguiente expresión:

#### **Ecuación 2: Corrección de emisiones por exceso de Aire (EA)**

$$C_{\text{corregida}} = C_{\text{medida}} \times \left( \frac{EA_{\text{medido}} + 100}{(EA_{\text{maximo}} + 100)} \right)$$

Donde:

C corregida: concentración corregida en mg/m<sup>3</sup>N

C medida: concentración medida por muestreo isocinético

EA medido: exceso aire medido en muestreo isocinético.

EA máximo: exceso aire máximo permitido para el combustible (Tabla N°3).

En esta ecuación, si los valores de exceso de aire medidos son superiores a los establecidos como máximo para cada combustible, deberán ser corregidos por el exceso de aire máximo indicado en la Tabla 3.

Para el caso de las nuevas correcciones por oxígeno, la ecuación de referencia está definida por la resolución 955/2016, que dicta instrucción de carácter general sobre corrección por oxígeno en CEMS de centrales termoeléctricas y aplicables como metodología a las demás fuentes fijas citadas en los planes de descontaminación a corregir sus emisiones por oxígeno, de la mano de la siguiente expresión.

### **Ecuación 3: Corrección de emisiones por Oxígeno**

$$C_{\text{corregida}} = C_{\text{medida}} \times \left( \frac{20.9 - C_{\text{referencia } O_2}}{(20.9 - C_{\text{medida } O_2})} \right)$$

Donde:

C corregida: concentración corregida en mg/m<sup>3</sup>N

C referencia: concentración de corrección indicada por el PPDA o PDA

C medida: oxígeno medido en muestreo isocinético.

20.9: Concentración ambiental de oxígeno en %

Ambas correcciones serán ejecutadas mediante Excel, generando tablas de referencia con los resultados obtenidos de concentraciones exceso de aire y oxígeno, estableciendo las variaciones al momento de aplicar las correcciones.

En esta etapa tomamos los resultados de concentraciones corregidas por oxígeno y exceso de aire y las compararemos con los límites de emisión establecidos por el plan de descontaminación de Concepción Metropolitano, estableciendo el aumento de emisiones respecto de la nueva metodología y su aumento porcentual respecto de la antigua metodología propuesta por el método de determinación de emisiones de material particulado ISP.

## **2.4 Evaluar el impacto sobre las fuentes fijas que operan fuera de los parámetros de combustión ideales.**

Adicionalmente se realizó una modelación de referencia de calidad del aire, respecto de los decretos que califican a la zona de estudio como latente y saturada para MP<sub>10</sub> y MP<sub>2.5</sub>, situando las fuentes analizadas en un área de influencia hipotética, escogiendo para esto el aeropuerto carriel sur de Concepción.

Hecho esto, se procesaron los datos de viento provenientes de la estación meteorológica del mismo aeropuerto, los cuales se modelaron mediante el software R-Plot, quien entregó la distribución de rosas de viento para cada estación del año. Por último, los datos de concentración de emisiones corregidos por oxígeno y exceso de aire son procesados mediante el software Screen View, obteniendo una modelación de calidad del aire para los parámetros de MP<sub>10</sub> y MP<sub>2.5</sub>, estableciendo la concentración de emisiones diaria y anual para cada parámetro, durante las cuatro estaciones del año, definiendo como estas concentraciones son influenciadas al alza por el cambio de metodología.

## **2.5 Conclusión y análisis del capítulo**

Las metodologías seleccionadas para el análisis del presente capítulo son de carácter cuantitativo y de promedios simples en la primera etapa de análisis de los informes de muestreo, aplicando además modelos matemáticos EPA para viento y concentración de emisiones para determinar los resultados sobre calidad del aire.

Se elige esta metodología en base a contar con información oficial de emisiones de material particulado, facilitando así la aplicación de las ecuaciones de corrección definidas por normativa siendo estas las más adecuadas para la definición del real impacto en el aumento de la concentración de emisiones de material particulado que se analiza.

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 Análisis de muestreos isocinéticos de material particulado y gases de combustión.

##### 3.1.1 Tipos de fuentes fijas y combustibles utilizados.

Los datos de muestreos isocinéticos disponibles corresponden a 8 calderas de calefacción y agua caliente, cuyo rango de potencia térmica esta entre los 0.2 y 0.5 MWt, (Mega Watt térmicos) siendo los consumos de combustible nominales declarados y reportados en sus informes de revisión y pruebas de funcionamiento se encuentran en rangos de 50 a 100 kg/hora de consumo.

El combustible principal y exclusivo de las fuentes fijas evaluadas corresponde a leña en trozos y los muestreos fueron realizados durante el invierno de 2019.

Lo anterior permite obtener una muestra uniforme y situada en parámetros similares para validación del caso de estudio.

##### 3.1.2 Parámetros de gases y emisiones promedios de las fuentes.

Los resultados que a continuación se muestran, corresponden a los promedios entre corridas para las fuentes avaluadas, reportando los datos de concentración medida de material particulado total, caudal de gases corregidos por oxígeno y gases de combustión medidos en chimenea.

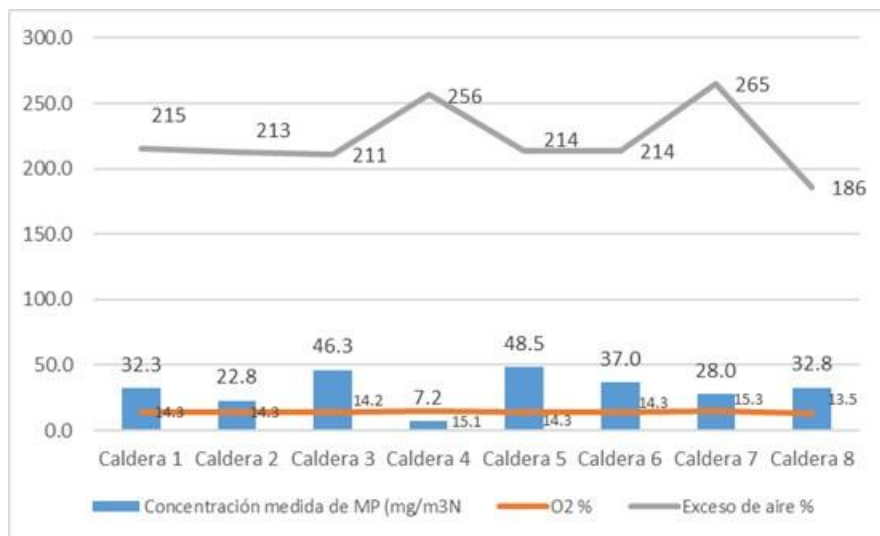
**Tabla 5.** Resumen de resultados de muestreo isocinéticos.

Calderas	Concentración medida de MP (mg/m <sup>3</sup> N)	Caudal de gases base seca corregido por O <sub>2</sub> (m <sup>3</sup> N/h)	O <sub>2</sub> (%)	CO <sub>2</sub> (%)	CO Corregido (ppm)	Exceso de aire (%)
1	32.3	1553.7	14.3	6.2	2828.3	215.0
2	22.8	921.0	14.3	4.9	2407.5	213.0
3	46.3	1173.3	14.2	6.0	2108.7	211.0
4	7.2	596.5	15.1	5.2	723.0	256.3
5	48.5	826.0	14.3	6.1	1561.0	213.5
6	37.0	767.0	14.3	6.1	3182.5	213.5
7	28.0	473.5	15.3	5.1	1373.5	265.2
8	32.8	482.5	13.5	4.8	2405.0	186.0

Fuente: Elaboración propia a partir de informes oficiales de muestreo

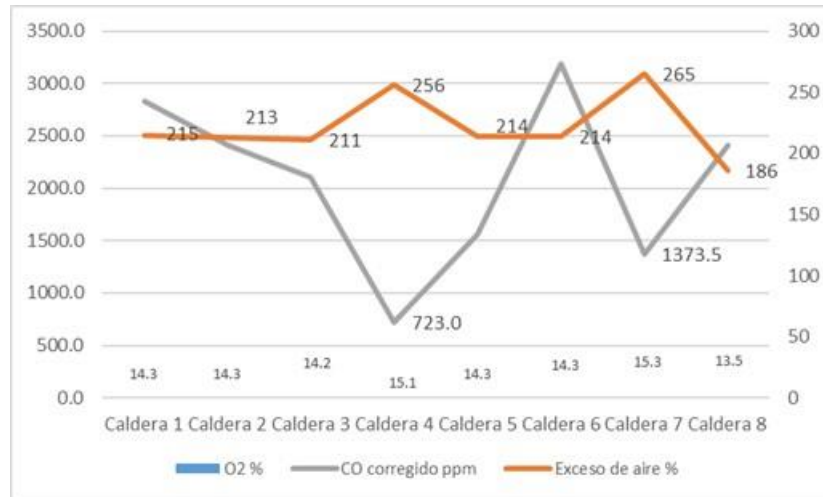
En este resumen de datos, se aprecia que, a mayor oxígeno y exceso de aire, la concentración de emisiones medida es la más baja para todos los muestreos evaluados.

Esto responde a una reducción de inquemados y a la dilución de la columna de gases donde se puede observar que a mayor presencia de oxígeno y exceso de aire las emisiones medidas son las más bajas del grupo de fuentes revisadas.



**Figura 1.** Parámetros de combustión y concentración de emisiones

Por último, esta relación de gases de combustión analizados y la disminución de emisiones de material particulado, se refleja también en las emisiones de monóxido de carbono de cada una de estas fuentes (Figura 2), donde para la caldera 4 y 7 se obtiene el mínimo de este gas, asociado principalmente a una combustión incompleta.



**Figura 2.** Relación emisión de CO en una combustión con mayor EA

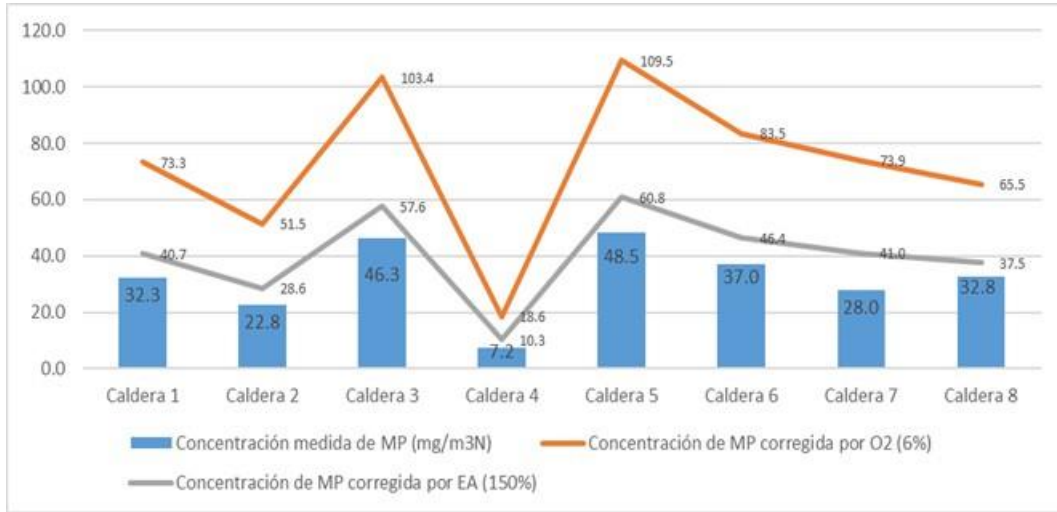
### 3.2 Comparación de las concentraciones de emisión corregidas por oxígeno y por exceso de aire con los límites de emisión de material particulado establecidos por el PPDA

En esta etapa, se exponen las concentraciones medidas de material particulado en  $\text{mg}/\text{m}^3\text{N}$  y se corrigen por el exceso de aire asociado a su combustible (150% para el caso de la leña) como hace referencia el método de muestreo isocinético oficial del ISP y también se realiza la corrección por el factor de oxígeno que indica el plan de descontaminación para el tipo de combustible sólido (6% de oxígeno)

Para lograr esto aplicamos las ecuaciones indicadas en la metodología, las cuales no entregan un  $F_o$ , por el cual se multiplican las emisiones medidas de material particulado.

El resultado de esta evaluación indica que hay un 79% promedio de aumento en las emisiones al corregirlas por el factor de oxígeno indicado por el plan de descontaminación de Concepción.

En la figura 3, se puede apreciar la emisión medida de MP y posteriormente los resultados de esta emisión corregida por exceso de aire y por oxígeno.



**Figura 3.** Concentración medida V/S las corregidas por EA y Oxígeno

Resultados Muestreo Isocinético	Unidad	Caldera 1	Caldera 2	Caldera 3	Caldera 4	Caldera 5	Caldera 6	Caldera 7	Caldera 8
Fo Oxígeno	Adim	2.3	2.3	2.2	2.6	2.3	2.3	2.6	2.0
Fo Exceso de aire	Adim	1.3	1.3	1.2	1.4	1.3	1.3	1.5	1.1
Concentración medida de MP (mg/m³N)	mg/m³N	32.3	22.8	46.3	7.2	48.5	37.0	28.0	32.8
Concentración de MP corregida por O₂ (6%)	mg/m³N	73.3	51.5	103.4	18.6	109.5	83.5	73.9	65.5
Concentración de MP corregida por EA (150%)	mg/m³N	40.7	28.6	57.6	10.3	60.8	46.4	41.0	37.5

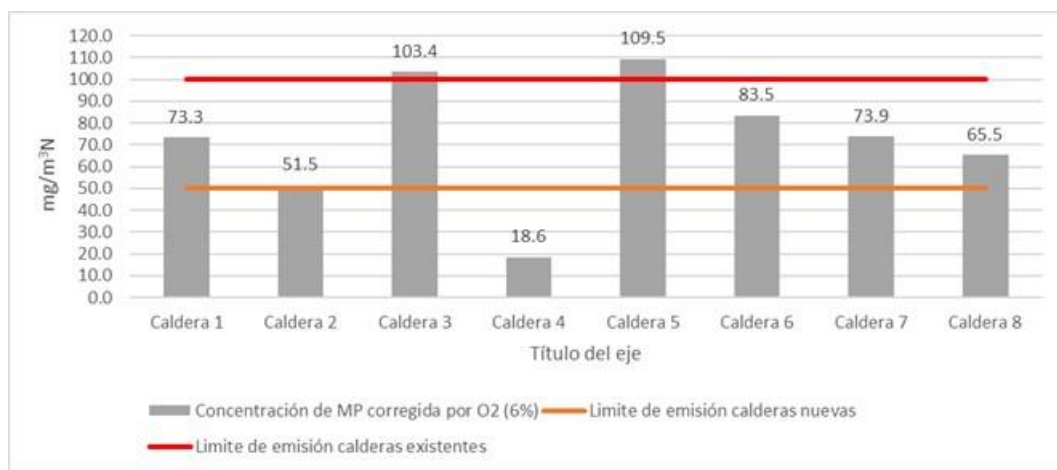
### 3.3 Evaluación del impacto sobre las fuentes fijas reguladas y que operan fuera de los parámetros de combustión ideales.

#### 3.3.1 Cumplimiento del límite de emisión del plan de descontaminación de Concepción.

Las fuentes evaluadas, de acuerdo con su potencia térmica deben cumplir con el un límite de emisión especificado por el plan, el cual de acuerdo con los equipos estudiados y en el caso de que sean fuentes existentes (instaladas antes de la publicación del plan) deberán cumplir con un límite de emisión de 100 mg/m³N y el

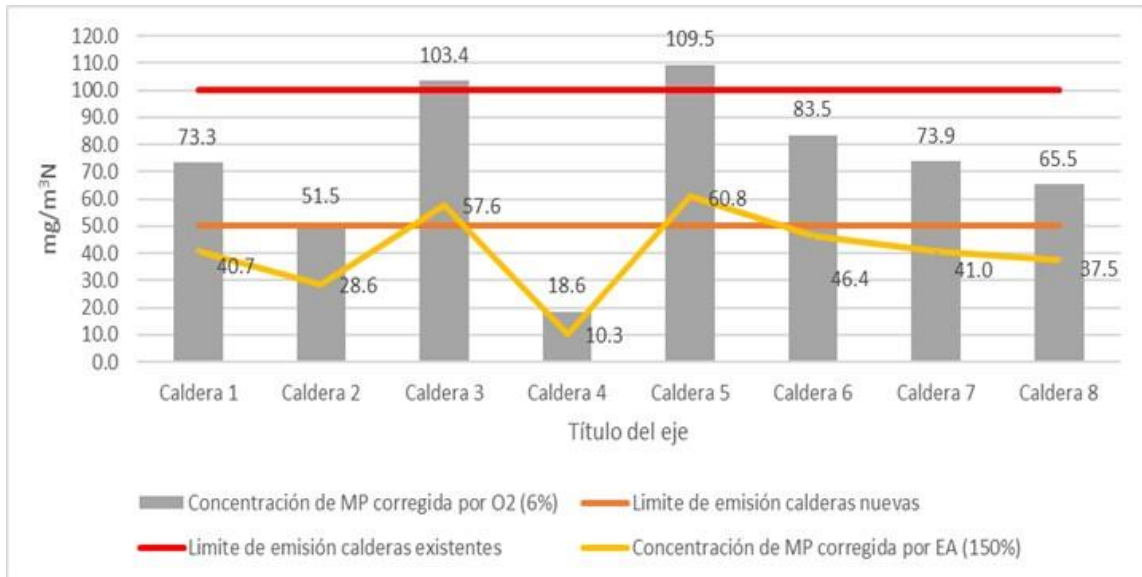
caso de las fuentes nuevas (instaladas con posterioridad a la publicación del plan) deberán cumplir con un límite de emisión de 100 mg/m<sup>3</sup>N.

Este escenario, deja en cumplimiento del límite de emisión establecido solo a 3 de las 8 calderas evaluadas, en el caso de que estas sean existentes y deban cumplir con el límite 100 mg/m<sup>3</sup>N. sin embargo para las calderas nuevas que deban cumplir con 50 mg/m<sup>3</sup>N, solo cumpliría el requisito la caldera número 4 (Figura 4).



**Figura 4.** Concentraciones corregidas por EA y Oxígeno V/S cumplimiento del límite de emisión.

Respecto de la metodología de corrección por el exceso de aire, definida en la metodología de muestreo isocinético del ISP y derivada de la metodología de origen EPA 5, ninguna caldera superaría los 100 mg/m<sup>3</sup>N y solo 2 de ella superarían el límite de emisión más exigente de 50 mg/m<sup>3</sup>N con concentraciones 57.6 y 60.8 mg/m<sup>3</sup>N (Figura 5).



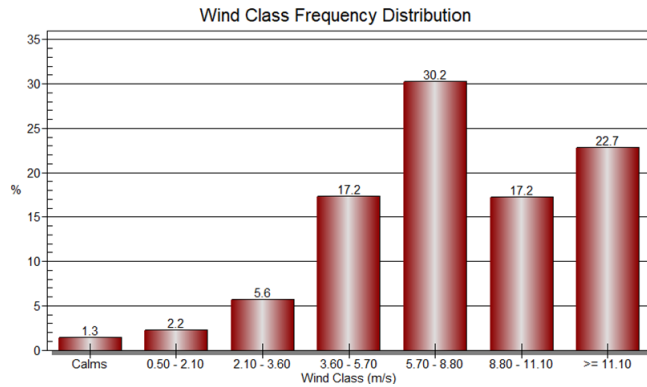
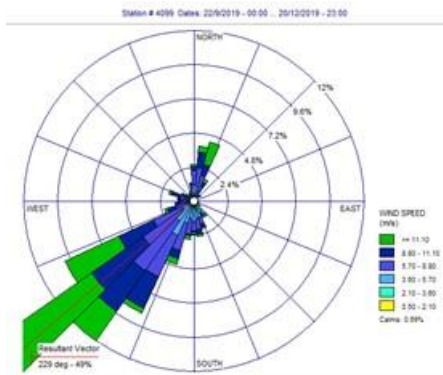
**Figura 5.** Concentración por EA y cumplimiento del límite de emisión.

### 3.3.2 Efecto sobre la calidad del aire en términos de emisión de MP<sub>10</sub> Y MP<sub>2.5</sub>.

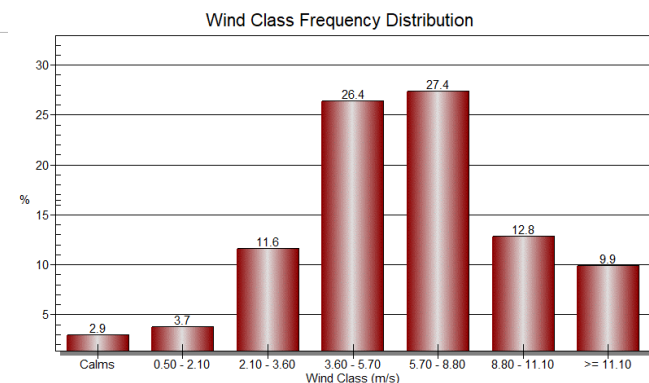
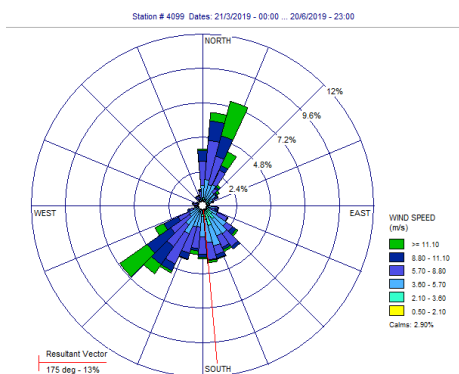
En esta etapa de la evaluación, las fuentes fijas se ubicaron hipotéticamente en el aeropuerto Carriel Sur, desde donde se obtiene la data meteorológica para la modelación definiendo la rosa de vientos predominante para las 4 estaciones del año.

La distribución de vientos para las 4 estaciones esta predominada principalmente por vientos con dirección sur, sur oeste en primavera y verano, mientras que en invierno los vientos cambian de dirección y se concentran en norte, noroeste.

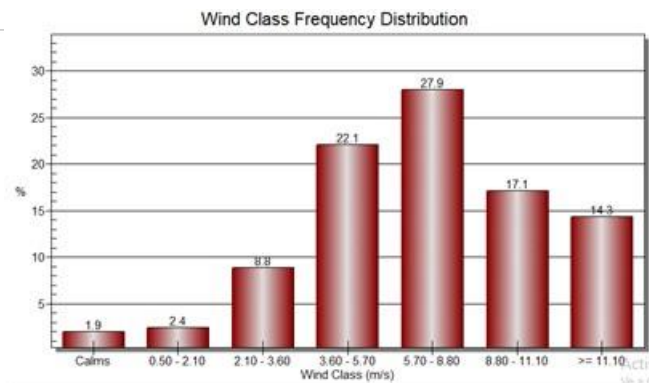
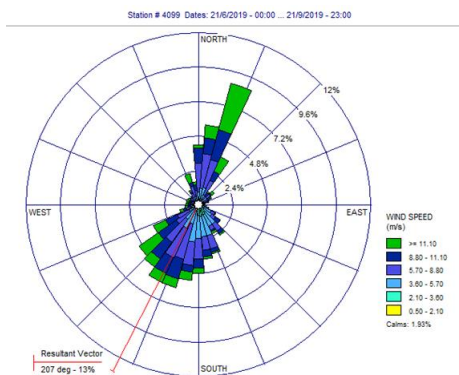
Para todas las estaciones frecuencia de distribución de vientos está liderada porcentualmente por vientos en rango de 5.7 y 8.8 m/s.



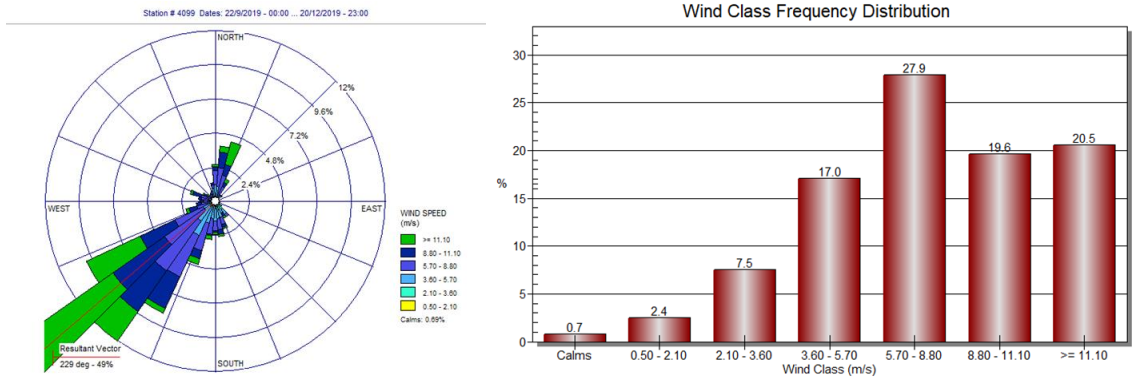
**Figura 6.** Rosa de viento y distribución para verano.



**Figura 7.** Rosa de viento y distribución para otoño.

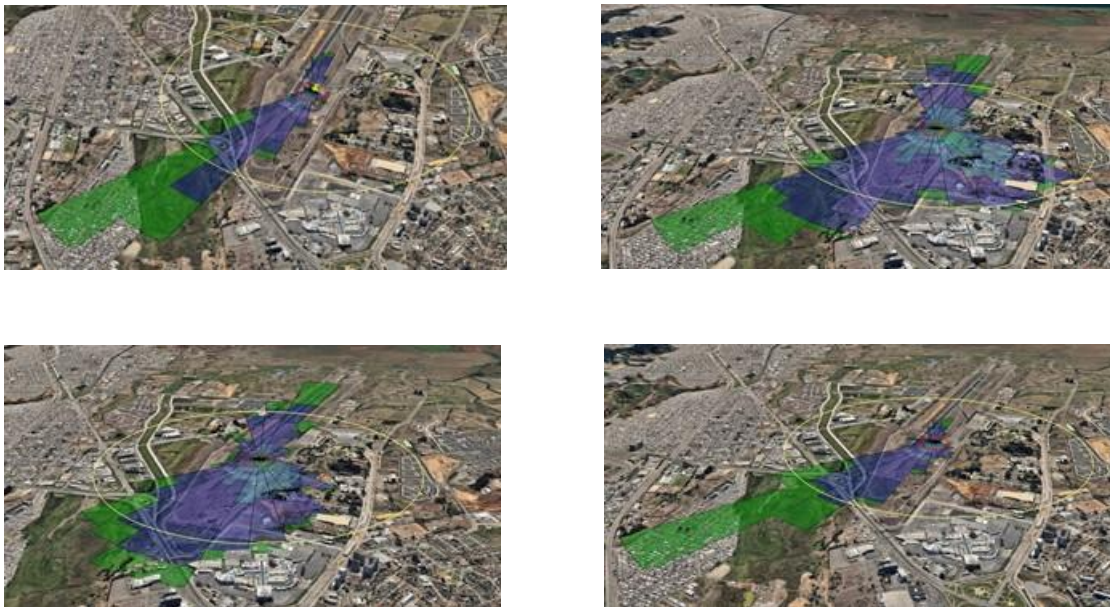


**Figura 8.** Rosa de viento y distribución para invierno.



**Figura 9.** Rosa de viento y distribución para primavera.

Respecto de esta distribución de vientos, se establecen los receptores más cercanos a un radio de 100 metros de la fuente y 1000 metros como máximo, donde se evaluará la concentración de emisiones de  $MP_{10}$  y  $MP_{2.5}$  a los que quedarán expuestos en condiciones de concentraciones corregidas por oxígeno y exceso de aire.



**Figura 10.** Distribución de vientos y receptores a 100 y 1000 metros de la fuente.

Como las concentraciones de material particulado (MP), corresponden a la fracción total de la emisión medidas en chimenea, se realiza una distribución porcentual de su participación, usando como referencia la AP-42 Section 1.6 Wood Residue Combustion in Boilers, donde obtenemos que un 34% del total de la emisiones corresponde a MP<sub>10</sub> y un 29% del total corresponde a MP<sub>2.5</sub>, lo anterior en consideración que los factores de emisiones para este tipo de combustible y fuente, derivan de un promedio basado en una serie de muestreos realizados.

Hecho esto, se preparan los datos de entrada al modelo, donde lo inicial es definir la tasa de emisión en g/s y parámetros de la fuente, como altura de chimenea, diámetro de ducto, velocidad de salida de gases, temperatura de gases obtenidos desde los informes de muestreo (Tabla 6).

**Tabla 6:** Distribución de emisiones y contaminantes total fuentes fijas.

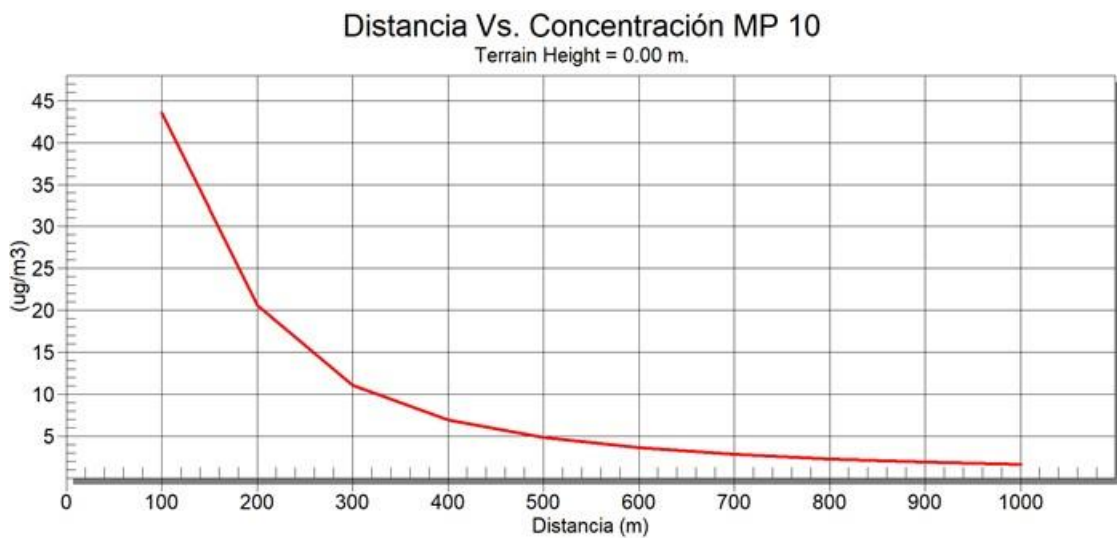
Parámetro	Emisión (g/s) corregida O2	Emisión (g/s) corregida EA
MP	0.053774411	0.029926226
MP <sub>10</sub>	0.04839697	0.026933604
MP <sub>2.5</sub>	0.040834943	0.022725228

Con estos datos, se realiza una modelación de emisiones, para el escenario de menor viento o peor condición tomando un rango estable de 1 a 4 m/s y velocidad del viento a los 10 metros de 2 m/s. definiendo la concentración máxima los 84 metros de distancia de las fuentes fijas.

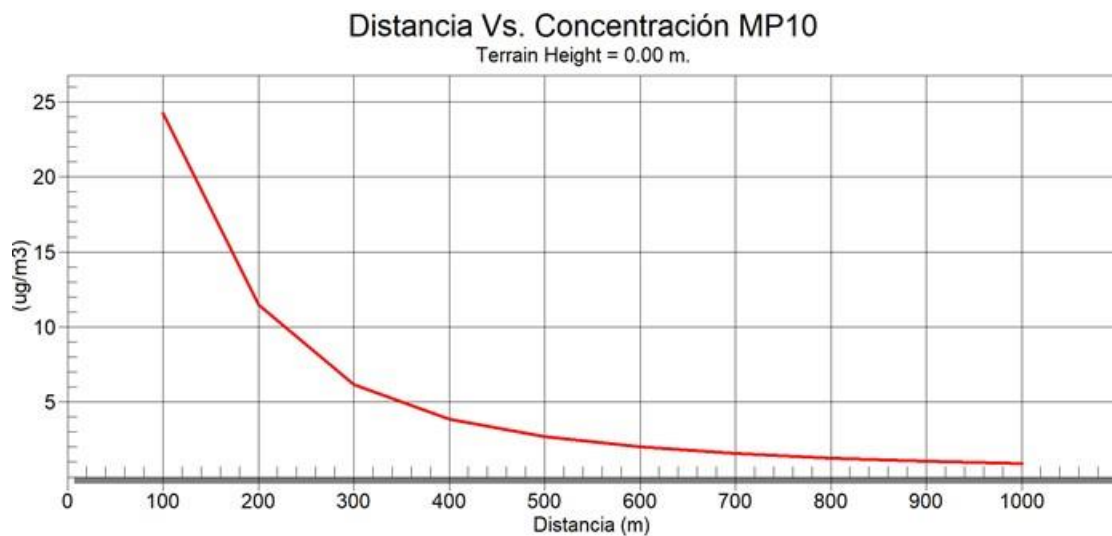
El resultado obtenido muestra un aumento del 79.7 % en la concentración de emisiones al ser corregidas por oxígeno, donde si bien el escenario hipotético cumple con la normativa de calidad del aire diaria y anual para MP<sub>10</sub> y MP<sub>2.5</sub>, queda de manifiesto un fenómeno de incremento de las concentraciones de emisión (Tabla 7).

**Tabla 7:** Cumplimiento de concentraciones para MP<sub>10</sub> y MP<sub>2.5</sub> diario y anual

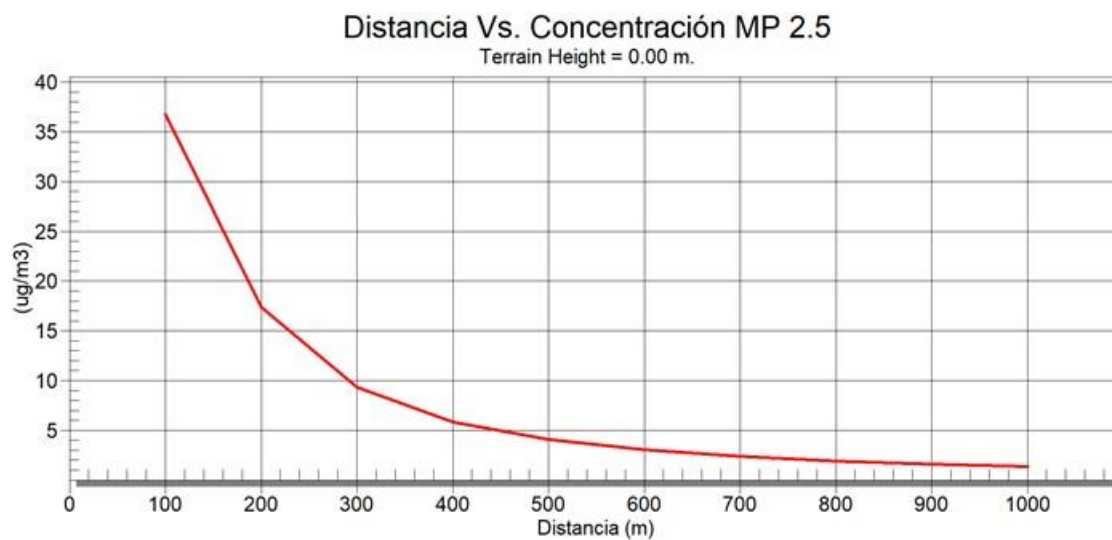
Parámetro	Normativa	Periodo	Máxima permitida (µg/m <sup>3</sup> )	Concentración corregida por oxígeno (µg/m <sup>3</sup> )	Concentración corregida por Exceso de Aire (µg/m <sup>3</sup> )	Distancia máxima (m)
MP <sub>10</sub>	D.S 12/11 MMA	Diario	50	18.24	10.15	84
		Anual	20	0.36	0.20	84
MP <sub>2.5</sub>	DS 59/98 MINGEPRES	Diario	150	15.39	8.56	84
		Anual	50	0.31	0.17	84



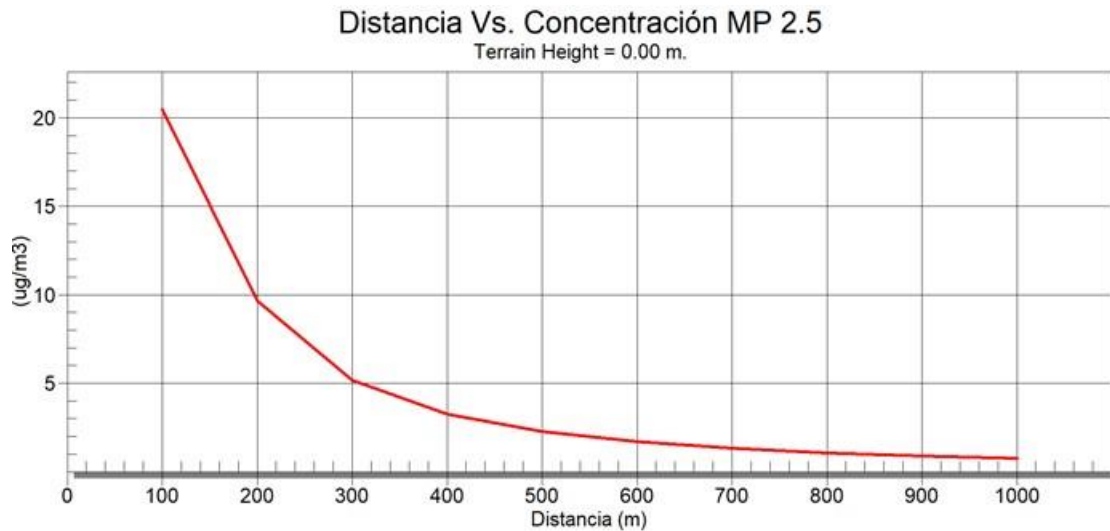
**Figura 11:** Resultado modelación MP<sub>10</sub> corregido por oxígeno



**Figura 12:** Resultado modelación MP<sub>10</sub> corregido por exceso de aire



**Figura 13:** Resultado modelación MP<sub>2.5</sub> corregido por oxígeno



**Figura 14:** Resultado modelación MP 2.5 corregido por exceso de aire

### 3.4 Criterio de corrección por oxígeno en otras regiones.

Derivado de los resultados antes planteados, queda la incertidumbre sobre el criterio de la aplicación de este cambio metodológico, considerando a priori que es una estrategia para erradicar el uso de leña como combustible, sin embargo si revisamos otros planes de descontaminación de la zona sur, encontramos un factor de corrección por oxígeno del 11 % para combustibles sólidos, generando solo un 19% promedio de aumento de emisiones al corregir por este valor, respecto del 79% de aumento derivado de la corrección al 6% de oxígeno evaluado para el PPDA de Concepción.

En este sentido queda la pregunta, sobre ¿por qué el factor de corrección es más riguroso en una zona más ventilada cómo Concepción y Valdivia? y más permisible en Temuco y Osorno?

**Tabla 8:** Porcentaje de corrección de oxígeno par planes zona sur.

Combustibles	EA Máximo de corrección (%)	O <sub>2</sub> de corrección (%)			
		PPDA Concepción	PDA Temuco	PDA Valdivia	PDA Osorno
Fuel Oil 2 (Diesel Grados A1-A2)	20	3	3	3	3
Leña trozos y astillas	150	6	11	6	11
Gas licuado	10	3	3	3	3
Kerosene	20	3	3	3	3
Aserrín	150	6	11	6	11
Gas Natural	10	3	3	3	3
Biogás	10	3	3	3	3
Gas de ciudad	10	3	3	3	3

### 3.5 Conclusión y análisis del capítulo

De acuerdo con los resultados obtenidos, se valida el aumento de emisiones respecto de la nueva metodología de corrección por oxígeno, como así también la importancia de revisar los parámetros de combustión de acuerdo con los resultados de la caldera N°2 que cumple con todos los límites de emisión.

El resultado general, provoca una barrera para el uso de leña en estas fuentes, siendo recomendable la implementación de un plan de trabajo con los regulados de tal manera que dispongan del tiempo adecuado para evaluar opciones de mejora en el proceso de combustión, cambio de matriz energética o implementación de sistemas de abatimiento.

Por otra parte, se presenta una oportunidad para los usuarios de este tipo de combustible, permitiendo abordar la problemática desde la gestión de sus operaciones e innovación, implementando acciones que permitan definir la mejor relación de gases de combustión, buscando obtener los resultados de emisión de la caldera N°2 y N°4.

Desde la gestión del negocio, el éxito de la acción anterior permitirá dar cumplimiento a los límites de emisión evitando así paralizar las fuentes en escenarios de pre o emergencia ambiental, evitando sanciones y multas como regulado, mantener disponibilidad productiva de la fuente, aumentar la eficiencia de combustión y ahorrar en costos adicionales a control de emisiones o cambio de matriz energética.

#### **4 CONCLUSIONES GENERALES**

Este trabajo logra establecer el impacto sobre un combustible y fuente fija al modificar la metodología de corrección de emisiones de material particulado respaldando que este cambio metodológico aumenta la concentración de emisiones de las calderas que utilizan leña en trozos, generando como resultado que el regulado y su fuente fija, no cumpla con los límites de emisión establecidos en la normativa, obligándolo a tomar acciones tendientes a optimizar sus proceso de combustión, implementar tecnología o cambiar la matriz energética por un combustible más limpio y costoso.

De acuerdo con el análisis de los informes oficiales de muestreo isocinético, se obtiene que existen relaciones optimas de combustión que permiten que las fuentes fijas analizadas reporten menores concentraciones de material particulado.

Estas relaciones optimas de combustión, se manifiestan en aquellas fuentes con la menor concentración de monóxido de carbono (caso caldera N°4 y N°7), siendo esta condición de gases lo más cercano a una combustión completa, reduciendo inquemados y material particulado, permitiendo además avanzar a la búsqueda de ese óptimo de combustión para este tipo de combustible.

Respecto de la comparación del cambio de metodología de corrección, se establece que la nueva modalidad de corrección por el 6% de oxígeno, aumenta en un 79% promedio las emisiones de material particulado para todas las fuentes analizadas, siendo las más afectadas aquellas que presentan mayor emisión de monóxido de carbono.

Este resultado, además, impacta sobre las fuentes fijas reguladas y que operan fuera de los parámetros de combustión ideales, provocando que solo una de las fuentes evaluadas cumpla con el límite de emisión más exigente de 50 mg/m<sup>3</sup>N (Caldera N° 4) y solo tres de ellas cumplan con el límite de emisión menos estricto de 100 mg/m<sup>3</sup>N.

En el contexto anterior, este aumento de emisiones medidas en chimenea, tiene un impacto similar sobre la calidad del aire y futuros pronósticos que se determinen, aumentado proporcionalmente en un 79.7% la concentración de emisiones modeladas para MP<sub>10</sub> y MP<sub>2.5</sub>.

Determinado el objetivo de este trabajo, adicionalmente se revisaron otros planes de descontaminación de la zona sur de Chile, encontrando que la ciudad de Temuco y Osorno, están obligadas a corregir sus emisiones medidas por un 11% de oxígeno, lo que genera que su aumento de emisiones sea solo del 19%, estableciendo la interrogante sobre el criterio de aplicar un % de corrección de oxígeno más estricto a una zona ventilada como Concepción y Valdivia (Costeras) y uno más conveniente a zonas donde derechamente se debería restringir con mayor fuerza las emisiones en vista de las implicancias a la salud de la población.

Finalmente, se establece que la tendencia de implementar esta nueva metodología tiene por objeto restringir el uso de leña como combustible, sin embargo, deja la oportunidad a los regulados de implementar mejoras en sus procesos para reducir sus emisiones, optimizar el uso de su combustible y reducir costos de operativos o adicionales por implementación de tecnología o cambio de matriz energética, siendo recomendable que trabajos futuros pudieran analizar más a fondo los potenciales de regular la combustión de leña, estableciendo un óptimo rango de operación.

## 5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barrios, S., & Peña, F. (2004). EFECTOS DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA POR MATERIAL PARTICULADO EN LAS ENFERMEDADES RESPIRATORIAS AGUDAS EN MENORES DE 5 AÑOS. *CIENCIA Y ENFERMERIA*, 3.
- Conibear, L., & Butt, E. W. (2018). Residential energy use emissions dominate health impacts from exposure to ambient particulate matter in India. *Nature*. Obtenido de <https://doi.org/10.1038/s41467-018-02986-7>
- EPA-US. (20 de 12 de 2020). <https://espanol.epa.gov>. Obtenido de <https://espanol.epa.gov/espanol/conceptos-basicos-sobre-el-material-particulado-pm-por-sus-siglas-en-ingles>
- IDEAM. (2010). *PROTOCOLO PARA EL CONTROL Y VIGILANCIA DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA GENERADA POR FUENTES FIJAS*. Bogota. Obtenido de <http://www.ideam.gov.co/documents/51310/527666/Protocolo+fuentes+fiijas.pdf/65780586-e70d-434a-9da7-264d3649b2ba>
- ISPCH. (2012). *DETERMINACION DE LAS EMISIONES DE PARTICULAS DESDE FUENTES ESTACIONARIAS*. Santiago: Instituto de Salud Publica. Obtenido de <http://www.ispch.cl/sites/default/files/METODO%20CH-5%20%282%29.pdf>
- Mardones, C., & Fuentes, J. (2017). REGULACIONES PARA REDUCIR EMISIONES DE MP 2.5 Y EXTERNALIDADES SOBRE SUS PRECURSORES CUANDO EXISTE DISPONIBILIDAD DE UN COMBUSTIBLE LIMPIO. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 6.
- Matus, P., & Oyarzun, M. (2019). Impacto del Material Particulado aéreo (MP 2,5 ) sobre las hospitalizaciones por enfermedades respiratorias en niños: estudio caso-control alterno. *Revista chilena de pediatría*, 170. Obtenido de [https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0370-41062019000200166](https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-41062019000200166)
- METHOD-EPA. (2017). *METHOD 3B - GAS ANALYSIS FOR THE DETERMINATION OF EMISSION RATE CORRECTION FACTOR OR EXCESS AIR*. EEUU: Electronic Code of Federal Regulations.
- MINSAL. (2002). *Modifica reglamento de funcionamiento de fuentes emisoras de contaminantes atmosfericos*. Santiago: Ministerio de Salud.
- MMA. (2019). *GUÍA METODOLÓGICA PARA LA ESTIMACIÓN DE EMISIONES PROVENIENTES DE FUENTES PUNTUALES, RETC*. Santiago: Ministerio del Medio Ambiente. Obtenido de [GUÍA METODOLÓGICA PARA LA ESTIMACIÓN DE EMISIONES PROVENIENTES DE FUENTES PUNTUALES, RETC: https://retc.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2020/01/GUIA-METODOLOGICA-PARA-LA-ESTIMACION-DE-EMISIONES-PROVENIENTES-DE-FUENTES-PUNTUALES.pdf](https://retc.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2020/01/GUIA-METODOLOGICA-PARA-LA-ESTIMACION-DE-EMISIONES-PROVENIENTES-DE-FUENTES-PUNTUALES.pdf)

- MMA-D15. (14 de 7 de 2015). *Planes de descontaminación atmosférica*. Obtenido de PPDA.MMA.GOB.CL: <https://ppda.mma.gob.cl/biobio/plan-para-las-comunas-de-concepcion/>
- MMA-D41. (25 de 7 de 2016). *Planes de Descontaminación Atmosférica*. Obtenido de PPDA.MMA.GOB.CL: <https://ppda.mma.gob.cl/biobio/plan-para-las-comunas-de-concepcion/>
- MMA-DS6. (17 de 12 de 2019). *Planes de descontaminación atmosférica*. Obtenido de PPDA: <https://ppda.mma.gob.cl/biobio/plan-para-las-comunas-de-concepcion/>
- MMA-PPDA. (2020). *Planes de descontaminación atmosférica*. Obtenido de ppda.mma.gob.cl: <https://ppda.mma.gob.cl/>
- MMA-SMA. (2016). *RESOLUCIÓN 955 EXENTA DICTA INSTRUCCIÓN DE CARÁCTER GENERAL SOBRE CORRECCIÓN POR OXÍGENO*. Santiago: MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE; SUPERINTENDENCIA DEL MEDIO AMBIENTE. Obtenido de <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?i=1095530>
- OMS. (2006). *Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado*. Ginebra 27, Suiza: Ediciones de la OMS.
- OMS. (2018). *Air quality and health*. Suiza: Editorial OMS. Obtenido de [www.who.int: https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- Pais-Circular. (29 de 4 de 2020). *Pais Circular*. Obtenido de [paiscircular.cl: https://www.paiscircular.cl/ciudad/sma-endurece-fiscalizacion-a-lena/](https://www.paiscircular.cl/ciudad/sma-endurece-fiscalizacion-a-lena/)
- Rojas, F., & Pacsi, S. (2019). Pronóstico de Reducción de Emisiones, de Enfermos y de Gastos Asociados al incluir el Gas Natural dentro de la Matriz Energética en Perú. *Información tecnológica*, 12. Obtenido de [https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?pid=S0718-07642019000300117&script=sci\\_arttext](https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?pid=S0718-07642019000300117&script=sci_arttext)
- SEMARNAT. (2011). *NORMA Oficial Mexicana NOM-085-SEMARNAT-2011, Contaminación atmosférica-Niveles máximos permisibles de emisión de los equipos de combustión de calentamiento indirecto y su medición*. Ciudad de Mexico: Estados Unidos Mexicanos, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- SMA-Res128. (31 de 01 de 2019). *Registro Nacional de Entidades Técnicas de Fiscalización Ambiental*. Obtenido de RETSMA: <https://entidadestecnicas.sma.gob.cl/Home/Documentos>
- TESTO. (2018). *Análisis de gases de la combustión industrial*. Alemania: Testo SE & Co. KGaA. Obtenido de <https://www.testo.com/es-ES/empresa/formacion-guias-practicas>
- Vargas, C. (0 de 0 de 2011). *Planes y Normas*. Obtenido de [planesynormas.sma.gob.cl: http://planesynormas.mma.gob.cl/archivos/2016/proyectos/Efectos\\_en\\_la\\_salud\\_particulado\\_Claudio\\_Vargas\\_2011\\_MINSAL.pdf](http://planesynormas.sma.gob.cl: http://planesynormas.mma.gob.cl/archivos/2016/proyectos/Efectos_en_la_salud_particulado_Claudio_Vargas_2011_MINSAL.pdf)
- WBank. (2018). *Tracking SDG7 The energy progress report full report*. Washington DC: World Bank Group.

WHO. (4 de 5 de 2006). *Fuel for Life: Household Energy and Health*. WHO. EEUU: World Health Organization 2006. Obtenido de <https://www.who.int/indoorair/publications/fuelforlife/en/>