



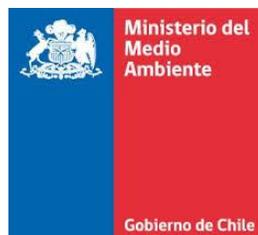
Centro Mario Molina • Chile

## INFORME FINAL

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE METODOLOGÍAS DE MEDICIÓN DE CALIDAD DEL AIRE INTRA-DOMICILIARIO Y MEDICIÓN DE EMISIONES DE CALEFACTORES EN USO, PARA EVALUAR EL IMPACTO DEL PROGRAMA RECAMBIO DE CALEFACTORES A LEÑA.

CMMCh • Noviembre 2013

Preparado para:



Este documento contiene información de la fase piloto del programa relacionado con la licitación N° 608897-80-LP12, demandada por el Ministerio del Medio Ambiente.

## 1. ÍNDICE DE CONTENIDOS

---

<b>1.</b>	<b>ÍNDICE DE CONTENIDOS</b> .....	<b>2</b>
<b>2.</b>	<b>RESUMEN EJECUTIVO</b> .....	<b>3</b>
<b>3.</b>	<b>ANTECEDENTES</b> .....	<b>4</b>
<b>4.</b>	<b>DISEÑO EXPERIMENTAL</b> .....	<b>8</b>
<b>4.1</b>	<b>Ubicación de los Sitios de Estudio</b> .....	<b>9</b>
4.1.1	Mediciones Intra-domiciliarias.....	9
4.1.2	Mediciones Extra-domiciliarias. ....	10
<b>4.2</b>	<b>Métodos de Muestreo</b> .....	<b>12</b>
4.2.1	Monitoreo Intra-domiciliario.....	12
4.2.2	Mediciones Extra-domiciliarias. ....	15
4.2.3	Análisis Químico de los Filtros.....	17
<b>4.3</b>	<b>Configuración de los Hogares</b> .....	<b>17</b>
4.3.1	Caracterización Habitacional y Registro de Actividades.....	17
4.3.2	Tipos de Estufas y Combustible Utilizado.....	18
<b>4.4</b>	<b>Procesamiento de datos y análisis estadísticos.</b> .....	<b>20</b>
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>21</b>
<b>5.1</b>	<b>Campaña Piloto</b> .....	<b>21</b>
5.1.1	Estado de Contaminación Extra-domiciliario. ....	21
5.1.2	Comparación de distintos escenarios Intra-domiciliarios. ....	23
<b>5.2</b>	<b>Campaña Oficial</b> .....	<b>27</b>
5.2.1	Análisis del estado extra-domiciliario. ....	27
5.2.2	Comparación de escenarios Intra-domiciliarios. ....	35
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>47</b>
<b>7.</b>	<b>Bibliografía</b> .....	<b>49</b>
<b>8.</b>	<b>Apéndice I</b> .....	<b>50</b>
8.1	Anexo 1: Cuestionario de Caracterización Habitacional.....	50
8.2	Anexo 2: Diario de Actividades .....	53
<b>9.</b>	<b>Apéndice II</b> .....	<b>54</b>



## 2. RESUMEN EJECUTIVO

---

El Centro Mario Molina Chile entrega a continuación la información final del estudio “Diseño e Implementación de Metodologías de Medición de Calidad del Aire Intradomiciliario y Medición de Emisiones de Calefactores en Uso, para Evaluar el Impacto del Programa Recambio de Calefactores a Leña”. En las páginas siguientes se podrán encontrar los resultados de la campaña piloto y oficial del estudio, desarrollado en la ciudad de Osorno durante los años 2012 y 2013.

En particular, la información contenida se refiere al desarrollo y ejecución del monitoreo intra-domiciliario en hogares cuyas estufas tradicionales fueron reemplazadas por artefactos de mejor tecnología, y en las cuales se incluyen mediciones realizadas en escenarios ex ante y ex post recambio, dentro de las que se encuentran también estufas a pellet. Las mediciones se basaron principalmente en la determinación de los niveles de material particulado (MP) en distintas fracciones, material particulado de diámetro inferior a 1 micrómetro ( $MP_{1,0}$ ), carbono elemental (CE), carbono orgánico (CO), levoglucosano (LEV), gases de óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ) y dióxido de azufre ( $SO_2$ ). Adicionalmente se compararon los resultados con los niveles encontrados en hogares sin recambio de estufas, y con niveles encontrados en sectores extra-domiciliarios en distintos puntos de la ciudad.

El presente informe describe el análisis de datos final y las principales conclusiones respecto al nivel de calidad del aire intramuros, en hogares sometidos al programa de recambio de calefactores desarrollados en la ciudad, junto a observaciones de los niveles de contaminación extra-domiciliarios, generados principalmente por la quema residencial de leña.

Los principales resultados indicaron que la ciudad se ve sometida a altos niveles de contaminación durante horas de la tarde en la época invernal. No obstante, el programa de recambio de calefactores efectivamente generó una mejoría en los niveles de contaminación intra-domiciliaria, lo que permite suponer que la implementación de calefactores de mejor tecnología genera también una mejoría en el aire extra-domiciliario.



### 3. ANTECEDENTES

---

La leña es la segunda fuente de energía en el país, con casi el 20% de participación en la matriz energética primaria (CNE, 2008), no obstante su combustión contribuye de manera notable en el aumento de los niveles de contaminantes en la atmósfera (Bruce N., 2000). Las principales partículas emitidas durante la quema de leña son pequeñas (radio aerodinámico menor a  $1 \mu\text{m}$ ). En una distribución por tamaños, el máximo número de partículas se alcanza entre  $0.15$  y  $0.41 \mu\text{m}$  (Hays, 2002), y existen gran cantidad de partículas en la fracción ultrafina ( $< 100 \text{ nm}$ ).

Además, dada la forma en que se utiliza esta energía, ya sea para cocinar o para calefaccionar los hogares, generalmente se asocia con alzas en los niveles de contaminación intradomiciliaria e incrementos en las incidencias de enfermedades respiratorias y eventos cardiacos (Naeher L., 2007; Fullerton DG., 2008). El humo proveniente de la quema de leña contiene una mezcla considerable de compuestos dañinos, como el benceno, formaldehído, hidrocarburos aromáticos policíclicos y dioxinas, cuyos niveles se acercan a los encontrados en zonas industriales y otros ambientes contaminados, donde los efectos biológicos han sido documentados (Kim KH., 2011).

Dado que la mayoría de los combustibles de biomasa siguen siendo fáciles de obtener, se han mantenido como la principal fuente de energía doméstica en muchas partes del mundo, de las cuales Chile no se encuentra ajeno. La excesiva quema residencial de leña húmeda, y la mala calidad de los equipos, ha logrado que varias ciudades emplazadas en los valles del sur del país presenten niveles elevados de material particulado fino ( $\text{MP}_{2.5}$ ). Específicamente, la ciudad de Osorno ha sido una de las más afectadas, siendo la primera ciudad en ser declarada como zona saturada por  $\text{MP}_{2.5}$  (noviembre 2012).

Internacionalmente, los planes estratégicos se han dirigido a la promoción de combustiones limpias y el desarrollo de tecnologías de control de emisiones. Como resultado se ha conseguido implementar soluciones costo-efectivas, por ejemplo la instalación de estufas mejoradas que reducen la emisión de productos dañinos, y/o que reducen el contacto humano, desviando los contaminantes hacia el exterior del hogar. Recientemente, programas y estudios de intervención de estufas se han

desarrollado en China (Edwards RD., 2007), México (Romieu I, 2009), y Estados Unidos (Ward T.J., 2008), entre otros. Los resultados fueron disímiles, pero sin duda alentadores, de cualquier manera los resultados de estas intervenciones son altamente dependientes de una variedad de factores que incluyen el tipo de combustible, la eficiencia relativa de la estufa de remplazo, la facilidad de su uso, el mantenimiento, la operación apropiada, y su adaptabilidad a la cultura local (especialmente si es usada para cocinar). La iniciativa de recambio más prometedora hasta la fecha está liderada por la Fundación de las Naciones Unidas (Global Alliance for Clean Stoves 2010) que tiene como meta lograr que 100 millones de hogares en el mundo adopten el uso de estufas eficientes y limpias para el 2020.

En nuestro país, la organización de los Planes de Descontaminación Atmosférica ha incorporado las iniciativas internacionales, y se han llevado a cabo programas de recambio de calefactores y subsidios para la utilización de madera seca como combustible y mejoramiento de la aislación térmica en los hogares. Adicionalmente, se han comenzado a implementar normativas que regulan el mercado y las emisiones de los calefactores a leña, y otros derivados de madera, que tengan potencia menor o igual a 25 kilowatts (kw). La norma determina niveles exigentes si se la compara, por ejemplo, con lo que se exige actualmente Estados Unidos. No obstante se espera que con ella sea posible lograr un cambio tecnológico gradual en el mercado de los calefactores, hacia aquellos equipos que capturen la mayoría de sus emisiones.

Previamente, en el primer informe de avance, se dispuso de la información relacionada a los análisis de los datos históricos de calidad del aire de la ciudad de Osorno, desde el año 2008 al 2012. De los hallazgos encontrados se comentaron la superación de la norma de  $MP_{2.5}$  y la tendencia del aumento de concentración de este contaminante en los meses de invierno, como consecuencia directa del exhaustivo uso de leña en calefacción residencial y cocina (Figura 1). El análisis meteorológico correspondiente al mismo periodo, arrojó la presencia de vientos de velocidades predominantes entre 1-2 m/s, como también una temporada invernal con bajas temperaturas nocturnas y alta humedad relativa, que propician el uso prolongado de calefacción y su posterior emisión de contaminantes atmosféricos.



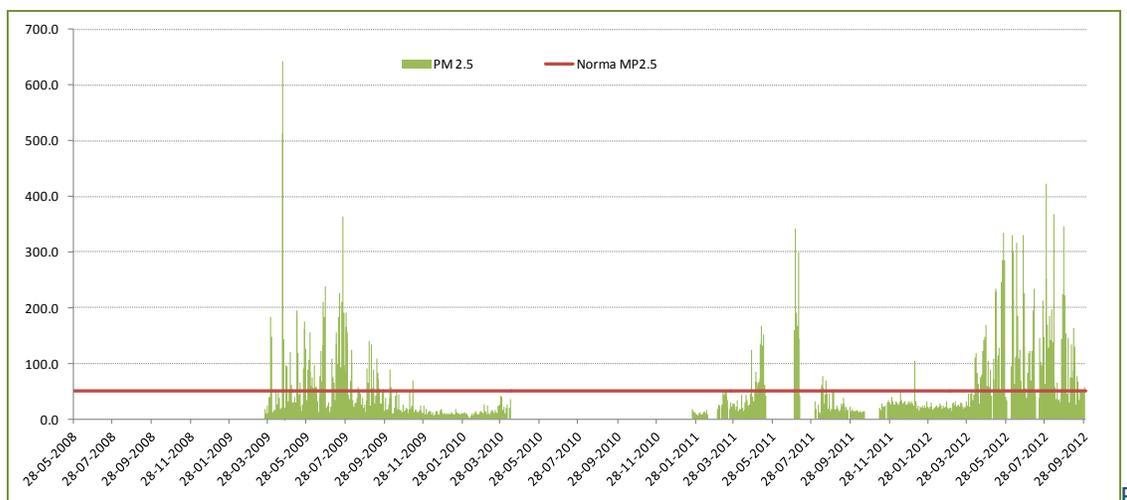


Figura 1. Concentración de  $MP_{2.5}$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) en la ciudad de Osorno, entre los años 2008 y 2012.

Respecto a la contaminación al interior de una vivienda, esta depende fundamentalmente de las fuentes internas, como asimismo de las fuentes externas cuyos contaminantes sean capaces de desplazarse hacia dentro del hogar, través de aperturas tales como puertas, ventanas, grietas y hendiduras en la construcción. A pesar de lo anterior, no toda la contaminación exterior alcanza el ambiente interior, ya que algunas partículas y gases poseen una dinámica compleja que incluye la deposición en superficies y reacciones que los transforman una vez en el interior.

Como consecuencia de esta dinámica, la contaminación exterior determina una parte significativa de las concentraciones observadas en condiciones intramuros, no obstante es común que las concentraciones de las partículas de origen exterior sean menores dentro del hogar, que fuera de él (Brauer M., 2008). Los mecanismos que afectan los niveles de partículas al interior de una habitación se ven determinados por factores como combustión en fuentes internas (cocina y calefacción), cuyos procesos de altas temperaturas son los principales generadores de partículas ultrafinas producidas por el cambio de fase de gas-sólido (Figura 2).

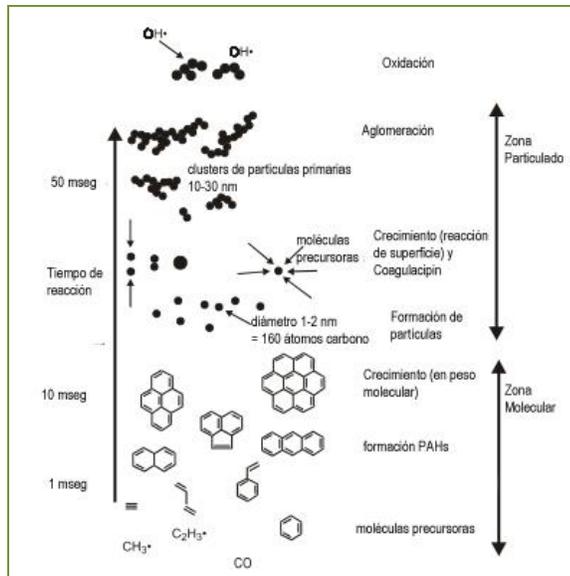


Figura 2. Esquema de formación de partículas ultrafinas en combustión de biomasa, mayoritariamente hollín. (Bockhorn, 1994)

Parcialmente debido a estos factores, el problema de la contaminación intradomiciliaria se incrementa durante los meses de invierno, ya que las personas tienden a pasar más tiempo al interior de los hogares, y además se mantienen con menores tasas de ventilación. Los calefactores a combustión pueden producir incrementos importantes en las concentraciones de diferentes contaminantes, e incluso pueden llegar a superar los estándares de calidad de salud internacionales. En especial, los calefactores a combustión de leña son fuentes importantes de emisiones de hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs), material particulado ultrafino y monóxido de carbono, altamente dañinos para la salud humana (Hoel, 2013).

Ante estos precedentes, uno de los objetivos del programa de recambio de calefactores efectuado en la ciudad de Osorno, apuntó al mejoramiento de la calidad del aire y salud de las personas, tanto dentro como fuera del hogar. En el segundo y tercer informe de avance se presentaron los resultados de la campaña piloto, la cual permitió establecer las condiciones óptimas de muestreo que permitieron asegurar prácticas de control de calidad, y la planificación de la campaña oficial efectuada en 12 hogares de la ciudad.

La configuración experimental propuesta permitió establecer diferencias entre los grupos de viviendas sin intervención de sus calefactores, con hogares a los que les fue cambiado el calefactor. Estos resultados fueron corroborados por las

observaciones rescatadas en mediciones ex ante y ex post al recambio de calefactores, en el mismo hogar, del cual resaltó la mejoría de la condición del aire intra-domiciliario al efectuar un recambio por un calefactor perteneciente al programa, no obstante, más aún por el recambio a una estufa a pellet.

#### 4. DISEÑO EXPERIMENTAL

---

Para determinar el impacto del Programa de Recambio de Estufas a Leña, se colectaron datos de calidad del aire a nivel intra-domiciliario y extra-domiciliario, según una estrategia de monitoreo efectuada en la ciudad de Osorno, durante el invierno del 2012 (campaña piloto) e invierno del 2013 (campaña oficial). El muestreo fue desarrollado en una situación de cotidianidad, de forma que los resultados del estudio reflejaran condiciones de la vida real en el uso de los calefactores.

El diseño del estudio incluyó sesiones con muestreo simultáneo de los hogares junto al sitio exterior emplazado en la estación de monitoreo de la ciudad (El Alba) que representó la condición “ambiente”. Los contaminantes seleccionados para el monitoreo correspondieron a MP en distintas fracciones (10 - 0.01  $\mu\text{m}$ ) en emisiones directas a través de los ductos de salida de las estufas y en el ambiente intra-domiciliario. También se registraron los niveles asociados de MP<sub>1.0</sub>, LEV, CE y CO, gases NO, NO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub>, además de parámetros físicos como temperatura, humedad relativa, consumo de leña y datos de operación del calefactor.

Complementario a las mediciones de calidad del aire, en cada vivienda se completó un diario de actividades informando el horario de uso de los calefactores más otras actividades relevantes para el estudio. También se registraron las características de cada vivienda a través de un cuestionario de caracterización habitacional (Apéndice I).

La Figura 3 ilustra el diseño experimental de la campaña oficial, el cual permitió desarrollar diferentes tipos de estudios que son detallados a continuación:

1. Diseño tipo transversal (cross-sectional) en mediciones simultáneas en hogares cuyos calefactores fueron reemplazados por calefactores pertenecientes al programa



de recambio, en comparación a calefactores tradicionales no pertenecientes al programa de recambio.

2. Diseño tipo ex ante y ex post, en hogares con calefactores tradicionales que fueron sometidos al proceso de recambio a estufas de leña mejoradas y estufas a pellet, durante el periodo de estudio.

3. Diseño tipo ex ante y ex post con grupo control, de manera similar a la anterior, pero se incorporó la comparación con un hogar considerado control, cuya estufa correspondió a un calefactor tipo salamandra, de baja tecnología.

Adicionalmente, se contrastaron todas las situaciones con los resultados de sitios extra-domiciliario, según mediciones efectuadas en la estación de monitoreo El Alba, y diferentes puntos de la ciudad.

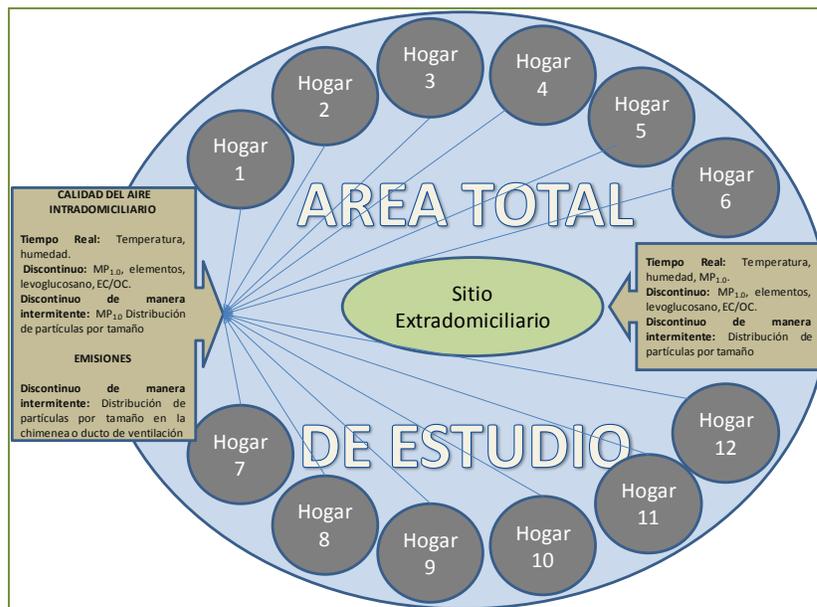


Figura 3. Esquema del diseño experimental del estudio desarrollado para evaluar el impacto del Programa de Recambio de Calefactores a Leña.

#### 4.1 Ubicación de los Sitios de Estudio.

##### 4.1.1 Mediciones Intra-domiciliarias.

La recopilación de datos fue desarrollada en la ciudad de Osorno, a través de la campaña piloto (4 hogares) y la campaña oficial, realizada en 12 viviendas cuya ubicación son mostradas en la Figura 4. Los hogares de la campaña piloto, fueron

nuevamente incorporados en el grupo de la campaña oficial, ya que en ellos se optimizaron los parámetros metodológicos necesarios para la correcta elaboración del estudio.

Dentro de la distribución de los hogares, 7 no pertenecieron al programa de recambio, mientras que 5 de los restantes correspondieron a hogares sometidos al programa de recambio. Dentro de la categoría “sin recambio”, 1 hogar fue destinado a ser la vivienda control y 3 hogares fueron intervenidos con la finalidad de evaluar los escenarios previos o posteriores al proceso de intervención, detallado en la sección 5.3.

El periodo total de muestreo en la campaña piloto abarcó 10 días, y la campaña oficial abarcó 22 días continuados, según el diseño propuesto que consideró mediciones discretas y continuas, como también muestras integradas de gases por difusión, en configuraciones semanales.

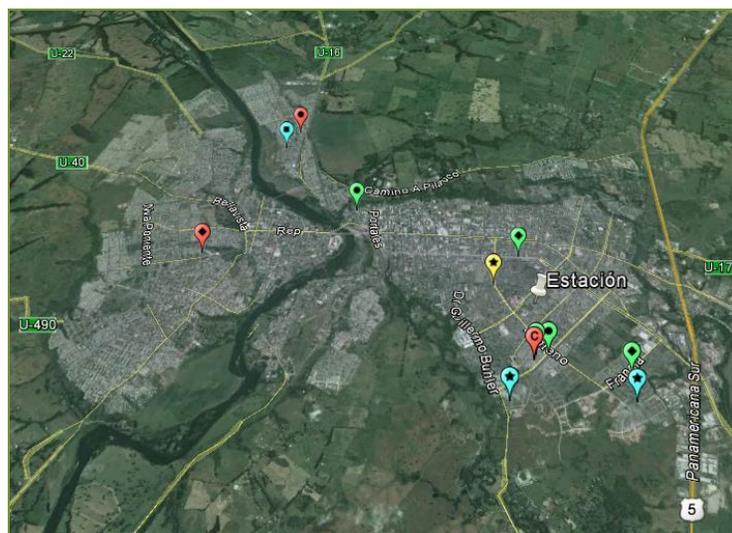


Figura 4. Ciudad de Osorno. Ubicación de la estación de monitoreo y las viviendas en donde se efectuaron las mediciones, según el tipo de categoría correspondiente. C: hogar control. ●: hogar perteneciente al programa de recambio. ◆: hogar no perteneciente al programa de recambio. ■: hogar no perteneciente al programa de recambio con intervención a estufa de leña mejorada. \* : hogar no perteneciente al programa de recambio con intervención a estufa a pellet. La simbología de color verde corresponden a hogares monitoreados la primera semana del estudio, color rojo para los hogares monitoreados la segunda semana, y en celeste y amarillo los hogares monitoreados la segunda y tercera semana, con mediciones en escenarios ex ante y ex post a la intervención.

#### 4.1.2 Mediciones Extra-domiciliarias.



#### 4.1.2.1 Campaña Piloto.

Durante la campaña piloto se realizó un mapeo preliminar de los niveles de contaminación de la ciudad, a través de la medición de  $MP_{2.5}$  y CE. Para esto, se trazó una grilla sobre el territorio que incluyó 25 puntos fijos, además de la localidad más próxima (Entre Lagos, Puyehue). La Tabla 1 muestra las coordenadas geográficas de los puntos en los cuales se efectuaron mediciones mediante instrumentos continuos. El horario en que se efectuaron las mediciones correspondió al periodo comprendido entre 9 pm-12 pm, horas críticas en los niveles de contaminación por quema de leña.

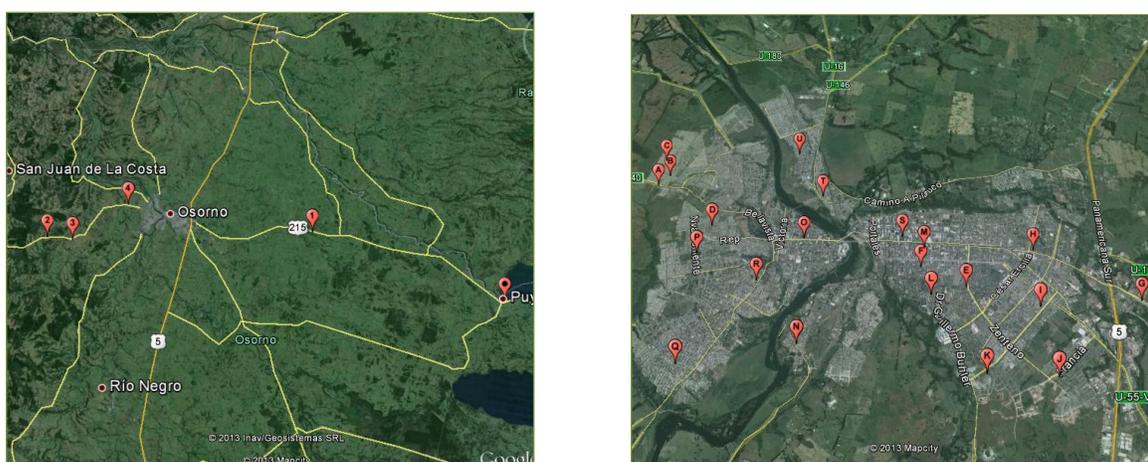


Figura 5. Representación sobre el mapa de los puntos de medición en la ciudad de Osorno (derecha) y en localidades periféricas (izquierda) durante la campaña piloto.

Sin embargo, el principal sitio de estudio extra-domiciliario se emplazó en la estación de monitoreo El Alba, en la cual se instaló durante 48 horas un instrumento de medición de MP en fracciones.

#### 4.1.2.2 Campaña Oficial

De igual manera que en la campaña piloto, se efectuaron mediciones de  $MP_{2.5}$  y CE de manera continua a lo largo de la ciudad. En esta oportunidad, se trazó una grilla sobre el territorio que incluyó 12 puntos fijos, mostrados en la Figura 6 izquierda. Las mediciones continuas de concentración de  $MP_{2.5}$  se realizaron a través del equipo DustTrak (intervalos de 1 segundo durante 10 minutos) y de CE mediante el equipo MicroAeth, según las recomendaciones sugeridas para sitios extra-domiciliario. El

horario en que se efectuaron las mediciones correspondió al periodo nocturno comprendido entre 10 pm-12 pm. En el caso de las muestras integradas de  $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_x$ , se diseñó una red de 12 puntos sobre la ciudad, tal como se ilustra en la Figura 6 derecha. Los difusores de gases colectaron muestras durante todo el periodo de estudio, con la finalidad de determinar el nivel promedio durante las 3 semanas contempladas.

La estación de monitoreo El Alba, se escogió nuevamente como emplazamiento principal para efectuar mediciones de MP en fracciones y  $\text{MP}_{1.0}$  de forma continua y discreta.

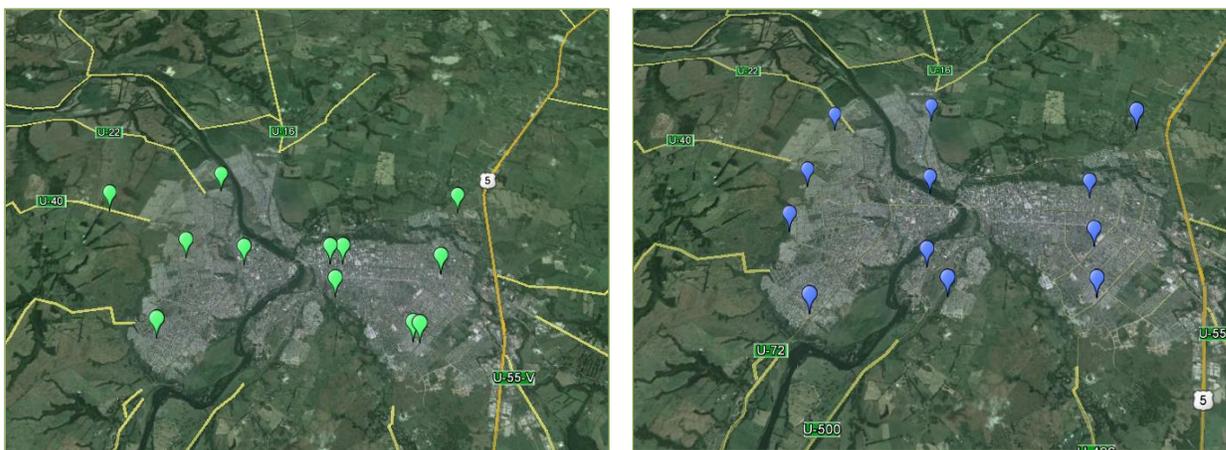


Figura 6. Izquierda; representación de los puntos de medición de  $\text{MP}_{2.5}$  y CE medidos en forma continua sobre la ciudad de Osorno. Derecha; diseño de la red de ubicación de los difusores pasivos de  $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_x$  sobre la ciudad de Osorno. Se consideró la instalación de 12 pares de colectores.

## 4.2 Métodos de Muestreo

---

### 4.2.1 Monitoreo Intra-domiciliario.

Para el monitoreo intra-domiciliario se preparó un sistema completo especialmente diseñado para mediciones al interior de viviendas. El sistema comprendió la utilización de diversos muestreadores integrados en un solo aparato de fácil instalación, tamaño reducido y baja emisión de ruido. El ensamblaje completo del sistema fue constituido por:

A) Medidor discreto de MP<sub>1.0</sub>: Impactadores de Harvard.



Figura 7. Impactador de Harvard separado en sus diferentes partes (izquierda) y ensamblado (derecha).

La Figura 7 presenta el impactador completamente ensamblado junto a sus principales componentes. El equipo consta de dos partes: el impactador, para separar partículas por tamaño, y el filtro de colección. Una representación esquemática y descripción del funcionamiento es explicada en el Apéndice II. En el presente estudio se utilizaron 3 Impactadores de Harvard en cada sistema completo, utilizando filtros de teflón para posteriores análisis de gravimetría y elementos, y filtros de cuarzos prequemados para posteriores análisis del contenido de levoglucosano y aerosoles carbonáceos (CE y CO), siguiendo el protocolo QBQ (cuarzo sobre cuarzo). Los filtros fueron dispuestos en cassettes especiales para evitar algún tipo de contaminación por manipulación (porta-filtro). Dentro de las prácticas QA/QC se dispuso el armado de estos cassettes en condiciones estériles, para luego ser ubicados al interior del cabezal, una vez que fuera armado el sistema dentro de cada vivienda.

B) Medidor continuo de MP<sub>1.0</sub>: DustTrak. Para el monitoreo en forma continua se usaron los equipos DustTrak (modelo 8520, TSI). Este equipo fue configurado de manera tal que registrara el promedio de las mediciones cada 2 minutos, operando a un flujo de 1.7 LPM.

C) Mediciones integradas de SO<sub>2</sub> y NO/NO<sub>x</sub>: Difusores Pasivos. Para el monitoreo de gases intra-domiciliarios, se utilizaron dispositivos de colección por difusión. Cada

difusor posee un filtro impregnado en un reactante, sujeto entre anillos de plásticos. Cada par de difusor fue ubicado a una altura cercana al cielo de la habitación en donde se ubicaba la estufa, de manera que se facilitara la entrada de los gases por difusión. La representación gráfica de los difusores son presentados en la sección 4.2.2.

D) Mediciones de Temperatura (T) y Humedad Relativa (HR): Correspondientes a Monitores HOBOS. En resumen estos instrumentos registraron parámetros de T y HR dentro de la habitación, en cada ciclo de 2 minutos.

Integrando los instrumentos anteriores, se armó un sistema completo de medición intra-domiciliaria (Figura 8) que fue localizado en la habitación donde se encontraba la estufa a leña, típicamente living o comedor, alejado de ventanas u otras fuentes interiores. Cada sistema fue conectado a una toma de corriente, sin embargo la salida de corriente a las bombas de los Impactadores de Harvard fue conectada a un temporizador con ciclo de encendido durante 10 minutos cada 1 hora. En total se completaron 240 minutos diarios de mediciones discretas en los distintos tipos de filtros. El equipo DustTrak fue conectado a una salida de corriente distinta, de manera que se mantuviera encendido durante todo el tiempo de medición programado.

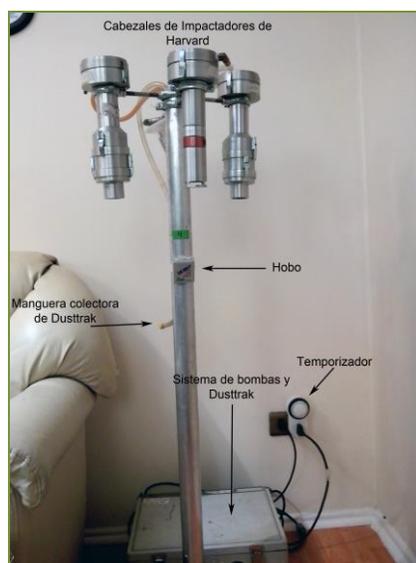


Figura 8. Sistema Completo de medición intra-domiciliaria. Incluye: Impactadores de Harvard y sus respectivos filtros, HOBOS, DustTrak y un temporizador conectado a las bombas de succión de aire.

Independientemente al sistema completo, se realizaron mediciones de MP en fracciones durante un día en cada hogar, utilizando el equipo ELPI+ (Electrical Low

Pressure Impactor, Dekati), que registró información sobre el número de partículas en tiempo real separadas en 14 fracciones (0.01 a 10  $\mu\text{m}$ ). Las mediciones comprendieron el periodo de funcionamiento de las estufas, y en algunos casos registró los periodos de encendido y apagado. Una breve descripción del funcionamiento del equipo es presentada en el Apéndice II. Los valores correspondiente a la emisión directa del calefactor a través del ducto, se entregarán en un documento Anexo, debido a que aún se encuentran en procesamiento.

#### 4.2.2 Mediciones Extra-domiciliarias.

Para determinar los niveles exteriores de los distintos contaminantes, se utilizaron los mismos instrumentos mencionados anteriormente, en una ubicación fija durante todo el periodo del estudio. Todos los instrumentos, a excepción de los difusores pasivos, fueron instalados en la estación de monitoreo El Alba. Tres Impactadores de Harvard fueron configurados según la misma metodología que los sistemas intra-domiciliarios, sin embargo operaron a un flujo de aire superior (25 LPM) especificado para mediciones extra-domiciliarias. De esta forma se evita que los filtros se saturen de MP, que por lo general se encuentra en mayor concentración en los ambientes exteriores. Cada filtro, esta vez de 47 mm, colectó muestra durante una semana, en los mismos horarios que la medición intra-domiciliaria (10 minutos cada una hora), logrando representar la igualdad en tiempo de colección en ambos escenarios.



Figura 9. Impactadores de Harvard extra-domiciliarios. Izquierda: impactadores conteniendo filtros de teflón y cuarzo, para análisis de gravimetría/elementos y CE/CO. Derecha: ambos sistemas de impactadores, al fondo impactador con filtro para análisis de levoglucosano.

Adicionalmente, un equipo DustTrak efectuó monitoreo en tiempo real de  $MP_{1.0}$ , durante todo el periodo del estudio, mientras que el equipo ELPI+ se instaló durante 3 días, con la finalidad de observar las concentraciones y MP en fracciones. Los registros de T y HR extra-domiciliarios se registraron utilizando un instrumento HOBO8 en el exterior de la casa control. Los datos meteorológicos fueron obtenidos a través del sistema propio de la estación, y de la red de monitoreo agrometeorológica más cercana (Remehue, INIA).

Por otra parte, en diferentes localidades externas a la estación se instalaron 12 pares de difusores pasivos, según lo ilustrado en la Figura 6. Estos difusores fueron dispuestos en una caja protectora para lluvia, según se muestra en la Figura 10. Cada par de difusores se instalaron en altura, aproximadamente a 2.5 metros sobre el suelo, ya fuera sostenido a postes de cables eléctricos o ramas de árboles.



Figura 10. Difusores pasivos de  $NO_x$  y  $SO_2$ , junto al portador/protector para ambientes exteriores.

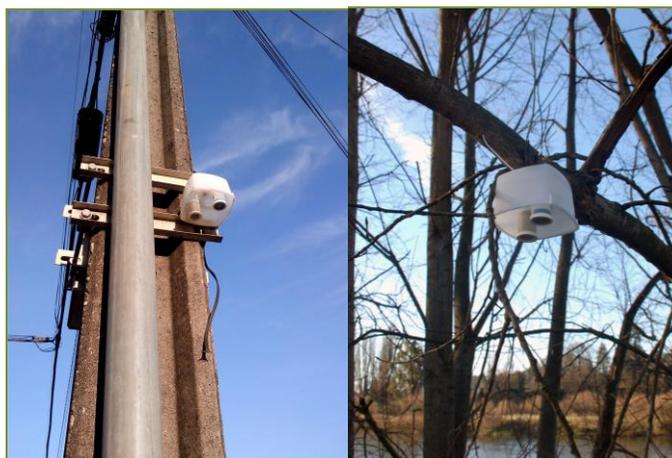


Figura 11. Instalación extra-domiciliaria de los pares de difusores pasivos.

#### 4.2.3 Análisis Químico de los Filtros.

La Tabla 1 resume las mediciones de contaminantes hechas por métodos discretos e integrados, cuyo material colectado fue enviado al respectivo laboratorio involucrado. En resumen, en cada vivienda 3 muestras simultáneas fueron obtenidas a lo largo de una semana, sobre filtros de 37 mm, siendo dos de ellas correspondientes a filtros de cuarzo. Todas las muestras fueron guardadas a  $-4^{\circ}\text{C}$  inmediatamente después del muestreo, y cubiertas con papel aluminio.

Tabla 1. Resumen de los tipos de análisis y metodologías para determinar distintos compuestos en  $\text{MP}_{1.0}$  tanto intra como extra-domiciliario.

Contaminante	Muestreador	Sustrato	Analito/ Método	Laboratorio
$\text{MP}_{1.0}$	Impactador de Harvard	Filtros de teflón	Masa/Gravimetría Elementos/XRF	Escuela de Salud Pública de Harvard, Boston, MA, EEUU
	Impactador de Harvard	Filtros de cuarzo	CE-CO/NIOSH	Desert Research Institute (DRI), Nevada, EEUU
	Impactador de Harvard	Filtros de cuarzo	LEV/HPLC-MS	FMI Finland Meteorological Institute.
$\text{NO}_x$ y $\text{SO}_2$	Difusores Pasivos	Filtros recubiertos	$\text{NO}_2$ y $\text{SO}_2$ / IC	IVL. Swedish Environmental Research Institute.

Como control de calidad para las muestras discretas se colectaron blancos en el hogar control y en el sitio exterior, siendo manejados idénticamente a las muestras reales, no obstante ningún flujo de aire pasó a través de los filtros. Los resultados que se encontraron bajo el nivel de incertidumbre no fueron considerados para los análisis estadísticos. Los resultados de LEV están pendientes de incluir debido a que no el laboratorio aún no ha reportado resultados.

### 4.3 Configuración de los Hogares

---

#### 4.3.1 Caracterización Habitacional y Registro de Actividades.

Durante esta campaña oficial se les pidió a los participantes completar un cuestionario habitacional para determinar el material de construcción del hogar, estructura de la habitación donde se ubica el calefactor, hábitos de uso de la estufa y



cocina, entre otros. Además, se pidió a cada dueño de hogar completar un “diario de actividades” en eventos horarios, para registrar información durante el periodo del estudio, con respecto al horario de encendido de estufas, cocina, horas de limpieza, entre otros. El uso de ventanas y puertas, como determinantes de ventilación también fueron registrados. Los participantes fueron visitados diariamente y los diarios fueron revisados por el personal de terreno. Los eventos más importantes encontrados por los instrumentos continuos fueron chequeados contra los registros en los diarios de los ocupantes, de modo de asegurarse que actividades relacionadas fueran registradas.

Dentro de las actividades más importantes se contó con el número de recargas efectuadas en el día, y el número de leños ingresados a la cámara. En el caso de las estufas a pellet, se consideró el porcentaje de carga expresado en el menú digital de la estufa, como también cada momento en que lo modificaran.

#### 4.3.2 Tipos de Estufas y Combustible Utilizado.

Para asegurar la calidad de las mediciones, cada hogar fue provisto de leña certificada en sacos de 25 kg, de los cuales se fue registrando el consumo en el diario de actividades. Al finalizar el estudio en cada hogar, se contó la cantidad de sacos consumidos, y en el caso de que quedara alguno sin finalizar, se pesó en una balanza para determinar por sustracción la última cantidad de leña consumida. También se les entregó un set de pastillas de encendido para evitar el uso de otros iniciadores de fuego como papeles, cartones o gasolina, que pudieran influir en los resultados finales.

Los leños secos fueron obtenidos a partir de árboles de eucaliptus, y sus medidas aproximadas fueron de 3x33 centímetros, cumpliendo con los parámetros dictados por el Sistema Nacional de Certificación de Leña (SNCL). El promedio de la humedad en cada leño se mantuvo alrededor de un 10-14%. Cada hogar almacenó la leña en sus propias dependencias y se les dio la libertad de consumirla libremente según sus hábitos normales de uso, que fueron registrados en el diario de actividades.

La principal configuración en los hogares, y a los cuales se evaluaron los resultados de las mediciones, se relacionaron con el tipo de estufa operada. Dentro de los hogares que no pertenecieron al programa de recambio, la mayoría de las estufas fueron de marcas comerciales como Amesti y Bosca, excluyendo la estufa control. A



estas estufas se les midió la dimensión de su cámara, con la intención de observar la existencia de algún tipo de influencia de este parámetro en los niveles de los contaminantes. A continuación se muestran algunas de las estufas no pertenecientes al programa de recambio.



Figura 12. Estufas no pertenecientes al programa de recambio. Derecha: Estufa control (tipo salamandra).

Para la evaluación de los escenarios ex ante y ex post se procedió a realizar un recambio de 3 estufas no pertenecientes al programa luego de una semana de medición. Dos de ellas fueron recambiadas por una estufa a pellet (marca Rika modelo Memo, Figura 13), de potencia calorífica entre 2,4 y 9 Kw. La siguiente restante fue cambiada a por una estufa igual a las pertenecientes al programa de recambio (marca Wamsler modelo Primo) de potencia 7 Kw. Una última estufa perteneciente al programa de recambio, volvió a ser cambiada, esta vez por una estufa a pellet. De esta manera, la anterior configuración permitió tener 3 escenarios ex ante- ex post, y cuyos resultados en cuanto a medición de MP y gases son entregados en la siguiente sección.



Figura 13. Tipos de estufas en escenarios ex ante y ex post. Izquierda: Estufa tradicional no perteneciente al programa de recambio. Centro: Estufa tradicional mejorada perteneciente al programa de recambio (Wamsler Primo). Derecha: Estufa a pellet (Rika Memo).

Tabla 2. Configuración de los hogares (C1-C12) respecto al escenario presente en la vivienda. (S/Recambio: hogar con calefactor no perteneciente al programa de recambio), (C/Recambio: hogar con calefactor perteneciente al programa de recambio), (CONTROL: hogar con calefactor control tipo salamandra).

PUNTO	Semana 1	Semana 2	Semana 3
<b>C1</b>	CONTROL	CONTROL	CONTROL
<b>C2</b>	S/Recambio		
<b>C3</b>			S/Recambio
<b>C4</b>	S/Recambio		
<b>C5</b>	C/Recambio		
<b>C6</b>	C/Recambio		
<b>C7</b>		C/Recambio	
<b>C8</b>	C/Recambio		
<b>C9</b>		S/Recambio	C/Recambio
<b>C10</b>		S/Recambio	Pellet
<b>C11</b>		C/Recambio	Pellet
<b>C12</b>		S/Recambio	Pellet
<b>OUTDOOR</b>		OUTDOOR	OUTDOOR

#### 4.4 Procesamiento de datos y análisis estadísticos.

Los resultados obtenidos para las mediciones de  $MP_{2.5}$  y CE a lo largo de la ciudad, fueron tratados estadísticamente usando el programa Stata 12 y el programa geoestadístico Surfer 11. Se realizó un mapeo de las curvas de nivel para ambos

contaminantes, utilizando el método de krigeaje (kriging) para la ilustración de un variograma sobre la ciudad de Osorno.

Sobre los resultados obtenidos a partir del equipo ELPI+ se elaboraron series de tiempo para la concentración del número de partículas y volumen ocupada en cada fracción de MP (1 nm a 10  $\mu$ m).

Estadísticas sumarias para los contaminantes fueron calculadas usando el software Excel 2013.

## 5. RESULTADOS

---

### 5.1 Campaña Piloto

---

#### 5.1.1 Estado de Contaminación Extra-domiciliario.

Durante la campaña piloto se evaluaron los niveles de CE y MP extra-domiciliario, con la finalidad de obtener una proyección del estado de contaminación en la ciudad de Osorno, durante el invierno. La Figura 14 muestra el comportamiento de CE, MP<sub>2.5</sub> y MP<sub>1.0</sub> en el periodo en que normalmente se mantienen funcionando los calefactores a leña. De los principales resultados obtenidos, se pudo observar que el MP<sub>2.5</sub> y MP<sub>1.0</sub> tienden a incrementar sus concentraciones alrededor de las 7 pm, alcanzando sus máximos entre las 9 y 10 pm, que coinciden con el ciclo de encendido de los calefactores. La concentración de ambos contaminantes disminuyeron durante el resto de la noche, hasta las 5 de la mañana, cuando comenzaron nuevamente a aumentar (aunque, en menor medida). En cuanto al CE, se observó un máximo cerca de las 9 pm, que también coincide con un incremento en los niveles de MP.

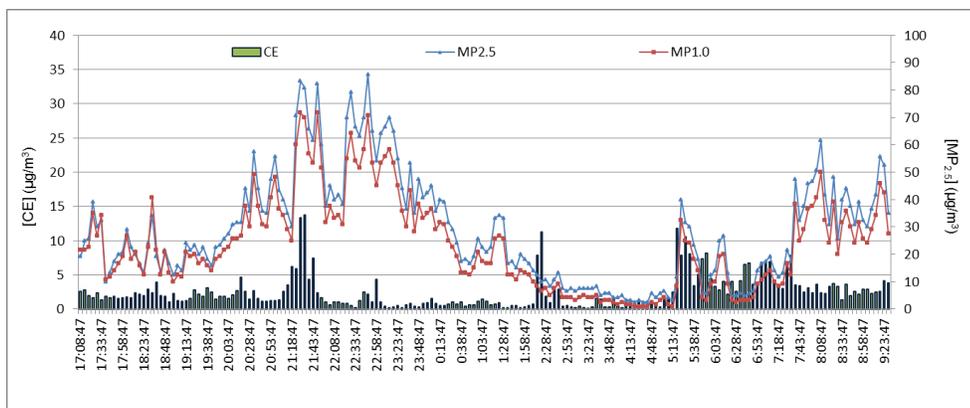


Figura 14. Comportamiento horario de las concentraciones de MP<sub>1.0</sub>, MP<sub>2.5</sub> y CE extradomiciliarios, medidos durante la campaña piloto.

El monitoreo realizado en distintos puntos de la ciudad, reveló que la distribución de áreas mayormente contaminadas por MP<sub>2.5</sub> se ubicaron en el sector central y poniente de la ciudad, en los horarios en que se observaron los máximos de contaminación (9 a 12 pm). Por otra parte, las curvas de nivel calculadas para la concentración de CE, estimaron mayores niveles en el sector central, impactado por el tráfico vehicular que recorren las principales avenidas emplazadas en esta zona.

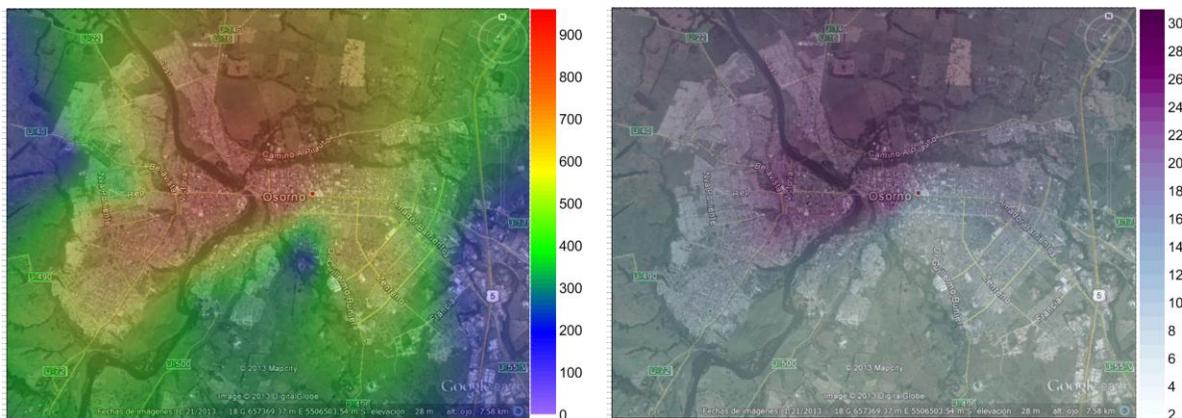


Figura 15. Distribución espacial de la concentración de CE (izquierda) y MP<sub>2.5</sub> (derecha) sobre la ciudad de Osorno. Unidades:  $\mu\text{g}/\text{m}^3$

En cuanto a la distribución en fracciones de MP, se observó predominancia del número de partículas ultrafinas menores a 0.1  $\mu\text{m}$ , que disminuye gradualmente hasta el rango donde se encuentran partículas con diámetro aerodinámico entre 3.97-6.69  $\mu\text{m}$ , mismo rango en donde se observa el máximo en la distribución por volumen (Figura 16 izquierda).

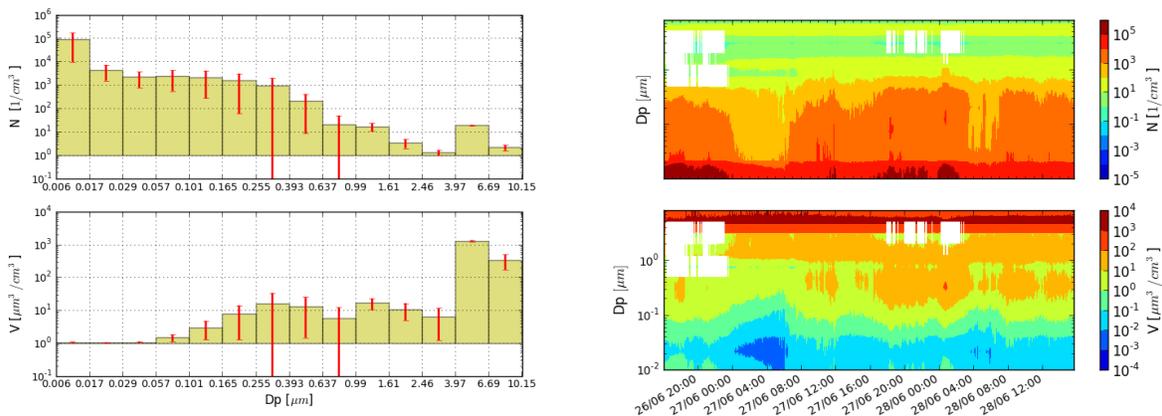


Figura 16. Distribución y perfil horario del MP extra-domiciliario en distintas fracciones de tamaño. Izquierda: distribución del número y volumen de partículas. Derecha: perfil horario de las concentraciones del número y volumen de partículas en sus distintos diámetros aerodinámicos.

Al observar el comportamiento horario en la distribución de las partículas, se vuelve a observar la predominancia de partículas finas y ultrafinas, cuales alcanzan máximos durante las 5pm a 12 pm aproximadamente. El resto de las partículas en los distintos rangos de diámetro aerodinámico presentan una concentración estable en el tiempo, situación distinta a la observada para las partículas de menor tamaño, quienes drásticamente disminuyen su concentración a partir de las 12 pm, y aumentan rápidamente a partir de las 7 am, aproximadamente. Lo anterior nuevamente puede ser asociado al periodo de uso de los calefactores a leña. La diferencia entre horarios también es posible observarla en el gráfico de distribución por volumen de la partícula, en donde se muestra la disminución del volumen de las partículas ultrafinas durante el periodo nocturno, y el aumento de volumen de las partículas finas durante la noche.

### 5.1.2 Comparación de distintos escenarios Intra-domiciliarios.

Una primera aproximación al estado de contaminación intra-domiciliario, en hogares intervenidos y no intervenidos, se realizó monitoreando continuamente  $MP_{1.0}$  en 2 viviendas. El principal resultado arrojó mayor concentración promedio del contaminante

en el hogar intervenido ( $93.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) en comparación al que no se le había efectuado recambio del calefactor ( $46.11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Al observar los registros de temperatura que reflejaban el ciclo de uso de los calefactores, se notó la diferencia de horarios de uso de los calefactores, indicando mayor consumo de leña en el hogar intervenido que hicieron aumentar las mediciones.

Se estudiaron factores físicos intra-domiciliarios y hábitos de las personas residentes, como una forma de parametrizar las variables que pudieran influir en las mediciones. El número de recargas también fue evaluada, y mediante una correlación entre características del hogar, como el consumo de leña y recarga, se determinó que la cantidad de leña es un hábito constante en el hogar con poca influencia de las pequeñas variaciones de la temperatura externa.

Al analizar en los distintos hogares las concentraciones promedio de  $\text{MP}_{1.0}$  en 12 horas de uso y no uso del calefactor, los resultados indicaron que existió mayor concentración de  $\text{MP}_{1.0}$  en el hogar con estufa no intervenida (tipo salamandra), en comparación a la intervenida y perteneciente al programa de recambio. Durante el periodo de no uso, existió una línea base similar de concentración de  $\text{MP}_{1.0}$  en ambos hogares. Al comparar la concentración de CE, durante las horas de uso, el hogar con estufa no intervenida presentó mayores niveles en comparación a la estufa de recambio.

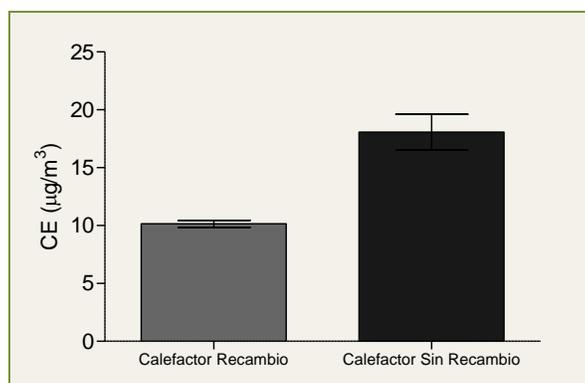


Figura 17. Concentraciones promedio durante 12 horas de CE, en horarios de uso de la estufa.

La concentración de partículas en las distintas fracciones, fue medida en el hogar con estufa intervenida. La distribución por tamaños indicó predominancia de

partículas ultrafinas con diámetro aerodinámico menor a  $0.6 \mu\text{m}$ , en modos nucleación y acumulación. Respecto al volumen que ocupa la partícula, se observa la predominancia en el volumen de partículas entre  $0.05\text{-}0.6 \mu\text{m}$ , y en la fracción gruesa del MP.

El perfil horario mostró un aumento del número de partículas, que se mantuvo estable aproximadamente 20 minutos. La Figura 18 permite observar que las partículas liberadas al momento de encendido de la estufa, correspondieron al rango de ultrafinas, mientras que las pertenecientes a rangos sobre  $0,1 \mu\text{m}$  se mantienen constantes durante el resto del periodo de medición. El volumen de partículas aumentó en el mismo periodo en que comienza a aumentar el número de partículas más grandes siguiendo el mecanismo típico de crecimiento (coagulación y condensación de partículas). Luego de 2 horas posteriores al encendido de la estufa, el número de partículas ultrafinas disminuye, junto al volumen ocupado, a valores que se mantienen estables en el tiempo. La Figura 22 representa la distribución promedio de la concentración en masa del MP. Se observa que la concentración predominante corresponde, nuevamente, a las partículas ultrafinas, en el rango  $0.7\text{-}2 \mu\text{m}$

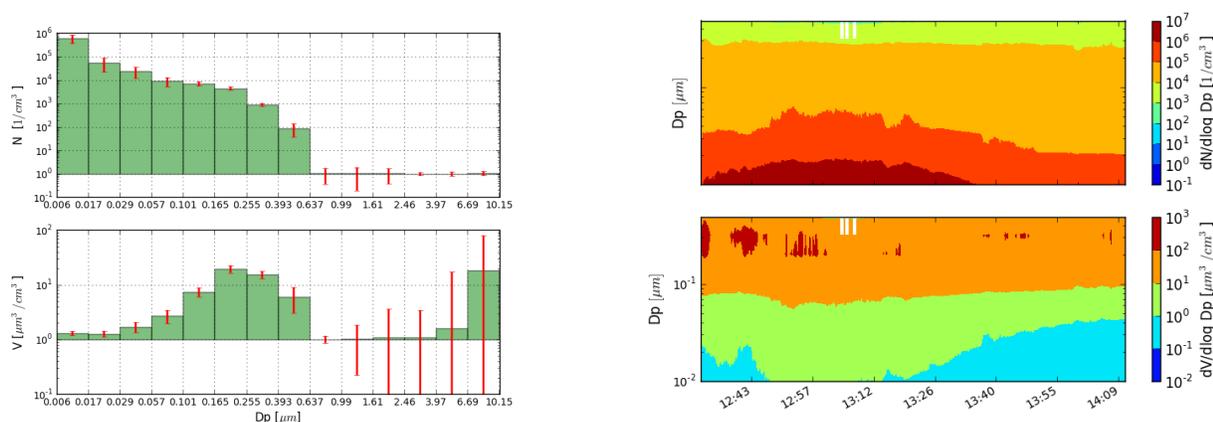


Figura 18. Izquierda: Distribución del MP en distintas fracciones de tamaño. Derecha: perfil horario de la distribución por tamaño de la partícula, en cuanto a número y volumen medidos luego de encender la estufa de recambio.

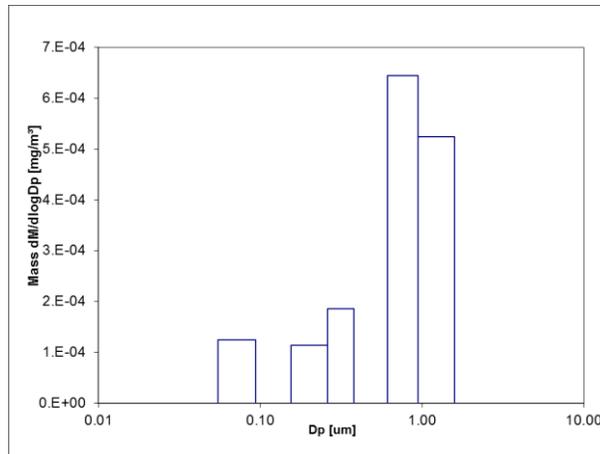


Figura 19. Distribución de la concentración en masa de las partículas en hogar con estufa de recambio.

Debido a que el uso de leña pareció ser un factor influyente en los resultados, se normalizaron los datos gravimétricos y elementales por la cantidad consumida de leña. El promedio integrado del nivel de contaminación intra-domiciliaria durante una semana fue menor en el hogar intervenido ( $79 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) en comparación al sin recambio ( $199 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Al normalizar por el consumo de leña, se vuelve a observar mayor concentración en el hogar sin recambio, el cual además presentó mayor concentración de CE y CO (Figura 20).

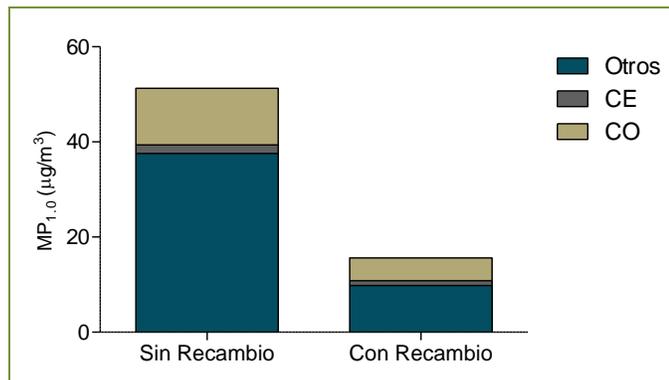


Figura 20. Concentración promedio normalizada de  $\text{MP}_{1.0}$ , CE y CO durante una semana en hogares con estufa del programa de recambio y estufa sin recambio.

## 5.2 Campaña Oficial

### 5.2.1 Análisis del estado extra-domiciliario.

La Figura 21 muestra las concentraciones de MP durante el monitoreo efectuado en el estudio. Adicionalmente, se incorporó el promedio de la estación El Alba (medición oficial de la red de monitoreo nacional). Las concentraciones gravimétricas en filtros, corresponden a cabezal de MP<sub>1.0</sub>, mientras que las concentraciones de estación El Alba, corresponden a MP<sub>2.5</sub>. Ambas fracciones pueden ser equivalentemente comparadas, dado que provienen de las mismas fuentes emisoras y procesos químicos atmosféricos, por lo que la diferencia en fracción es prácticamente despreciable. Durante las dos primeras semanas de monitoreo se obtuvieron concentraciones significativamente más altas que la tercera semana. Es importante mencionar este comportamiento temporal se observa tanto en concentraciones intra- domiciliarias, como extradomiciliarias. Las concentraciones intra-domiciliarias del hogar Control tienden a ser mayores que en la estación El Alba, en tanto que diferencias menores se obtuvieron al comparar con las concentraciones en filtros (Outdoor).

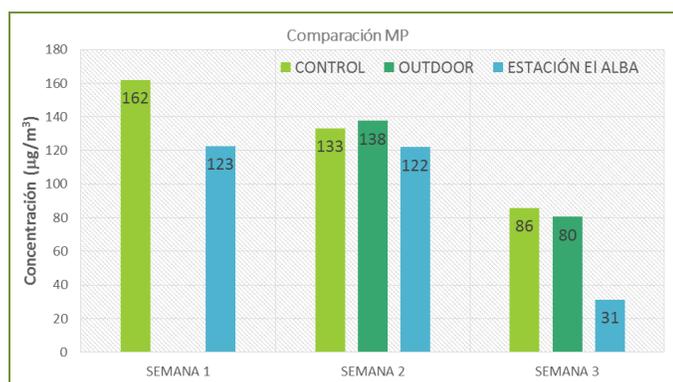


Figura 21: Concentraciones promedio de MP<sub>1.0</sub> en hogar control y sitio extra-domiciliario.

La tendencia temporal de las concentraciones puede ser explicada por factores meteorológicos. A contar del 28 de agosto se presenta un incremento de la temperatura, en unos 5 grados aproximadamente, con respecto a la situación anterior (Figura 22). Esto influye en un mayor calentamiento de la superficie terrestre y por lo tanto incrementa la altura de la inversión térmica radiativa. Durante la última semana se observó una acumulación importante de precipitaciones (Figura 23), explicando el



descenso de las concentraciones al término de la campaña.



Figura 22: Serie de tiempo de temperatura horaria (Red Agrometeorológica INIA).

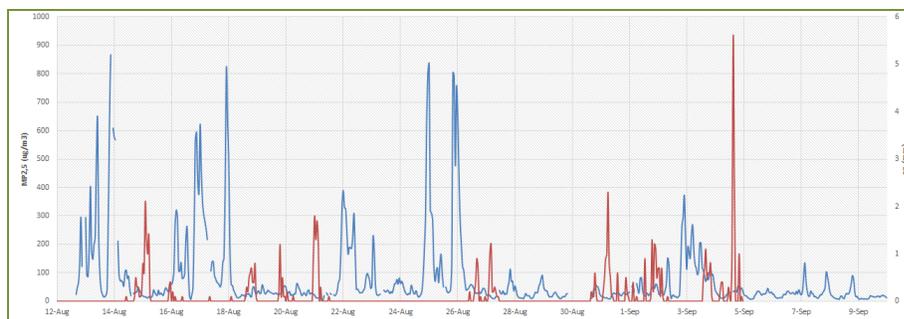


Figura 23: Serie de tiempo de concentración de  $MP_{2,5}$  (línea celeste, estación El Alba) y precipitaciones (línea roja, Red Agrometeorológica INIA).

Durante el periodo de estudio se observaron máximos de  $MP_{2,5}$  sobre  $800 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , mientras que el perfil diario de concentración de  $MP_{10}$  y  $MP_{2,5}$  (Figura 24) presenta un comportamiento semejante, con máximas durante la noche y mínimas a las 7 y 16 hrs. El descenso durante la tarde tiene relación con mayores condiciones de ventilación. En la Figura 26 se presenta el perfil de vientos para distintos segmentos del día. Prácticamente durante todo el día predominan vientos entre  $0.5\text{-}2.1 \text{ m/s}$  (60% del tiempo, aproximadamente), sin embargo, entre las 12-16 hrs las calmas (velocidades de viento menores a  $0.5 \text{ m/s}$ ) desaparecen y predominan vientos con velocidades entre  $2.1\text{-}3.6 \text{ m/s}$  (aumentando casi al doble en relación al resto del día). Lo anterior permite suponer que el incremento de la concentración durante la noche se deba a las menores condiciones de dispersión (expresado por la velocidad del viento).

Por otra parte, el análisis de la razón  $MP_{2,5}/MP_{10}$  entregó diferencias a lo largo del día. Se distinguieron dos períodos, cuyos máximos valores llegaron al 80%

(durante la noche y a las 9-10 hrs), mientras que el resto del día, se mantuvieron porcentajes cercanos al 60%. Independiente de la hora del día, se puede indicar que la variabilidad del  $MP_{10}$  estuvo determinada por la de  $MP_{2.5}$ . Lo anterior se puede explicar al considerar que durante la noche se incrementan las emisiones de calefacción residencial, principalmente a leña. Adicionalmente, en términos promedios una comparación entre la temperatura externa e interna (dentro de las casas) indicó diferencias significativas. Al interior de las casas se presentó una diferencia de temperatura menor, con una variabilidad de 4 grados, mientras que al exterior de las casas la diferencia fue de aproximadamente 10 grados. La variabilidad de la temperatura al interior de las casas estuvo dominada por el funcionamiento de los calefactores, y en segundo lugar por la temperatura exterior. De la Figura 25 se pudo observar que el funcionamiento de los calefactores se concentró principalmente durante la tarde y noche, después de las 17 hrs.



Figura 24: Perfil diario de concentración de  $MP_{2.5}$ ,  $MP_{10}$  y porcentaje de participación de MP fino en el total para cada hora (razón  $MP_{2.5}/MP_{10}$ ).

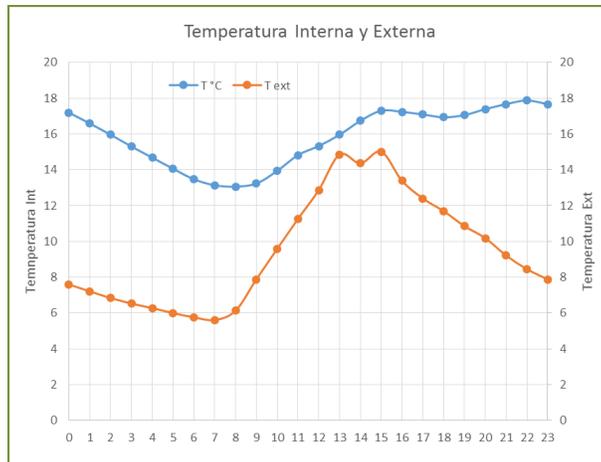


Figura 25: Temperatura Interna y Externa medida en la campaña de monitoreo. Promedio de todas las casas.

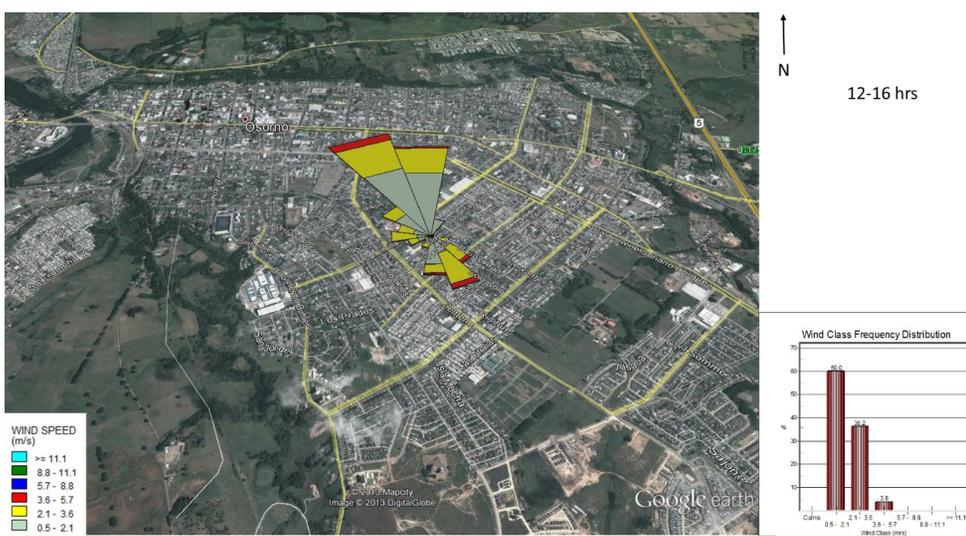


Figura 26: Perfiles de vientos en Estación El Alba durante el invierno del 2013.

Las mediciones integradas de contaminación por gases ( $\text{NO}_x$  y  $\text{SO}_2$ ) mostraron diferencias en la distribución dentro de la ciudad (Figura 27). Se observó, que en el caso de  $\text{NO}$ , las mayores concentraciones se presentaron en el nor-este de la ciudad, mientras que de  $\text{NO}_2$ , existieron mayores concentraciones en el sur-este. La suma de ambos óxidos de nitrógeno, representado por  $\text{NO}_x$ , indicó que las mayores concentraciones de estos contaminantes se encontraron en el sector centro y este de la ciudad. Una situación diferente se observó para el  $\text{SO}_2$ , el cual los valores se encontraron bajo los límites de detección, a excepción de un punto en particular, el cual es resaltado en el mapa de isolíneas que se muestra a continuación, en la Figura 28.

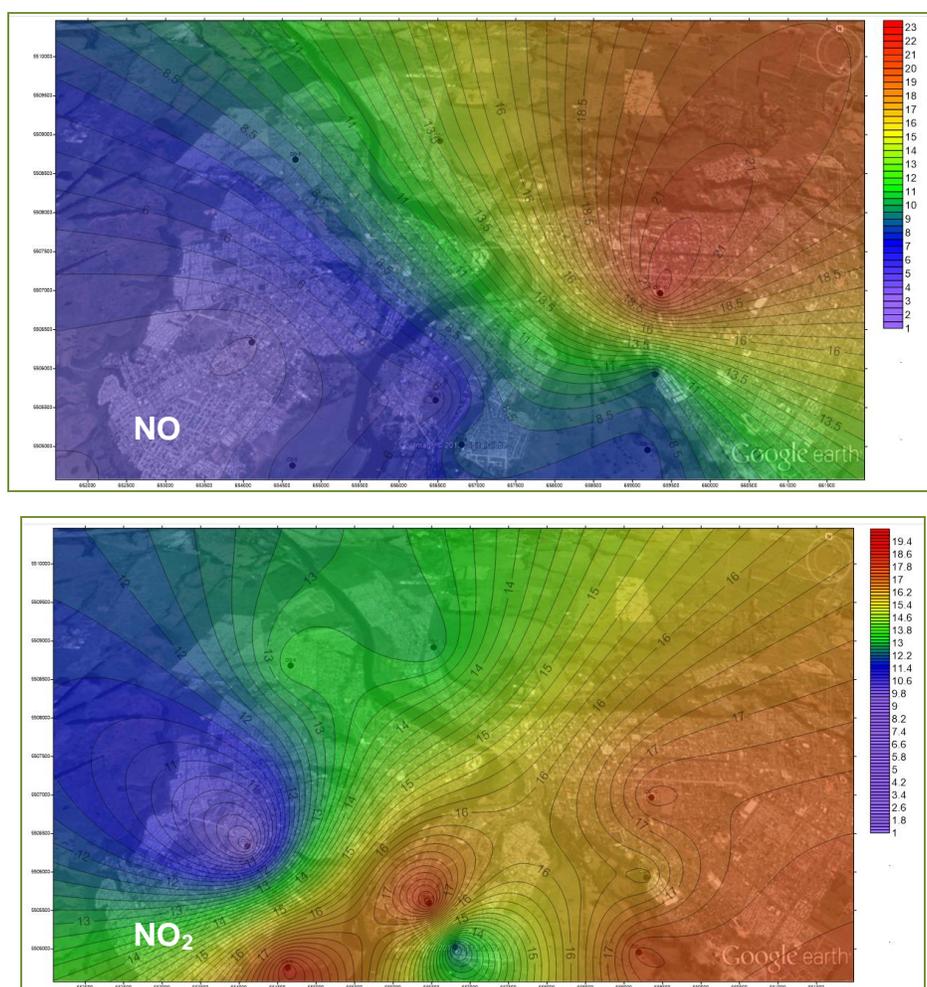


Figura 27. Mapa de isolíneas de concentración de  $\text{NO}$  (arriba) y  $\text{NO}_2$  (abajo). La barra de colores indica la concentración en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

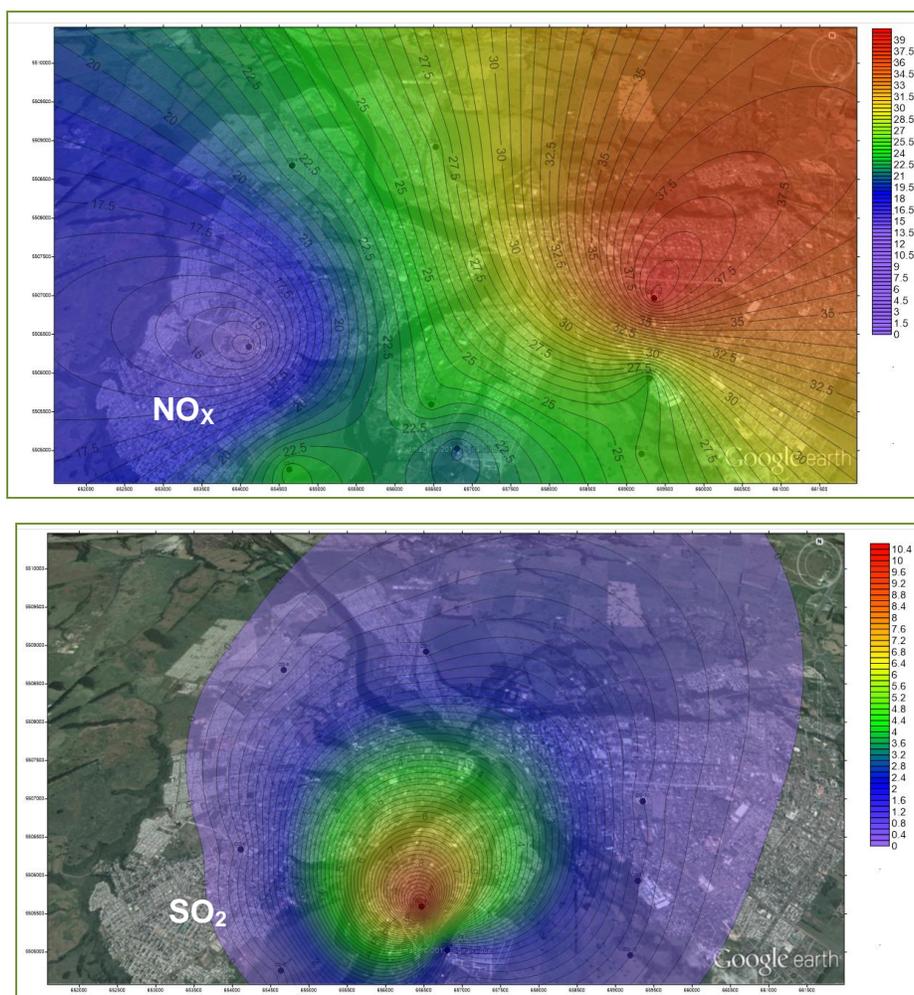


Figura 28. Mapa de isolíneas para mediciones integradas de  $\text{NO}_x$  y  $\text{SO}_2$  en la ciudad de Osorno, durante el periodo de estudio (agosto 2013).

En el caso de la contaminación por MP en la ciudad, se observó que la distribución de  $\text{MP}_{2.5}$  presentó mayores concentraciones en zonas del sur-este y nor-oeste de la ciudad, donde se encuentran áreas con mayores densidades poblacionales (Figura 29). Al evaluar las concentraciones según la fracción de MP, en mediciones integradas (promedios semanales), se determinó que la fracción ultrafina ( $\text{MP}_{1.0}$ ) presentó la mayor concentración de partículas, seguida por la fracción fina ( $\text{MP}_{2.5-1.0}$ ). A pesar de que en la última semana de monitoreo extradomiciliario disminuyó la concentración de MP, se puede observar que los niveles correspondientes a fracciones sobre  $2.5 \mu\text{m}$  se mantuvieron constantes. El perfil horario registrado corrobora esta información (Figura 31), en el cual se puede observar un aumento de las partículas más finas, en horarios asociables al periodo de uso de los calefactores a leña.

Por el contrario, las partículas superiores a  $3.97\ \mu\text{m}$ , se mantuvieron constantes en el tiempo.

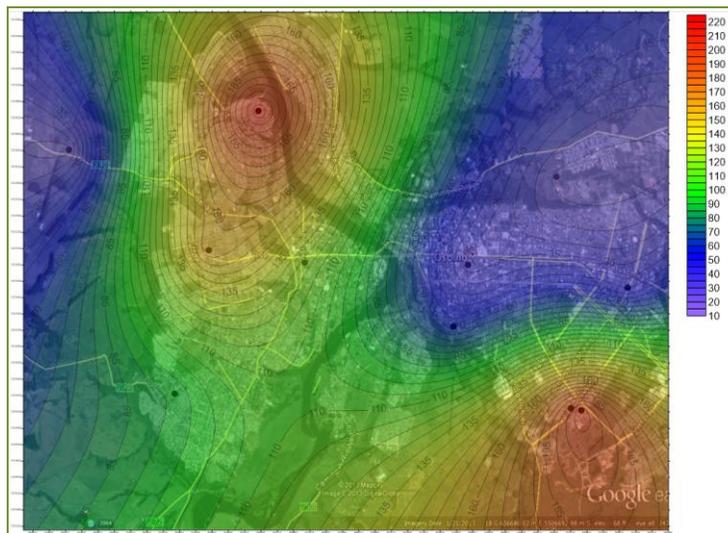


Figura 29. Distribución de concentración de  $\text{MP}_{2.5}$  en la ciudad de Osorno, medido entre las 9pm-12am (15 de agosto).

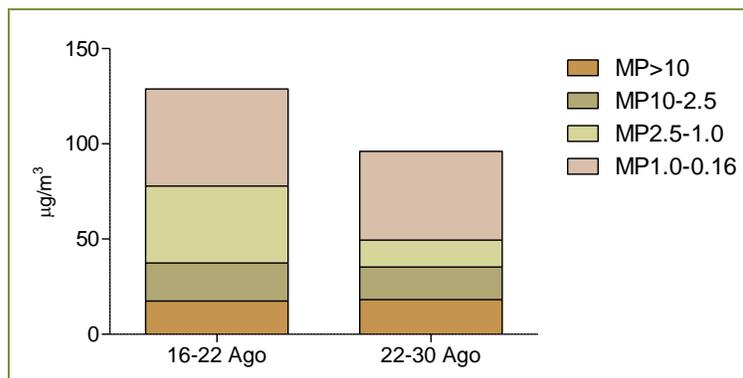


Figura 30. Concentración de MP en fracciones gruesa ( $\text{MP}_{10-2.5}$ ), fina ( $\text{MP}_{2.5-1.0}$ ) y ultrafina ( $\text{MP}_{1.0-0.16}$ ) durante dos semanas del estudio.

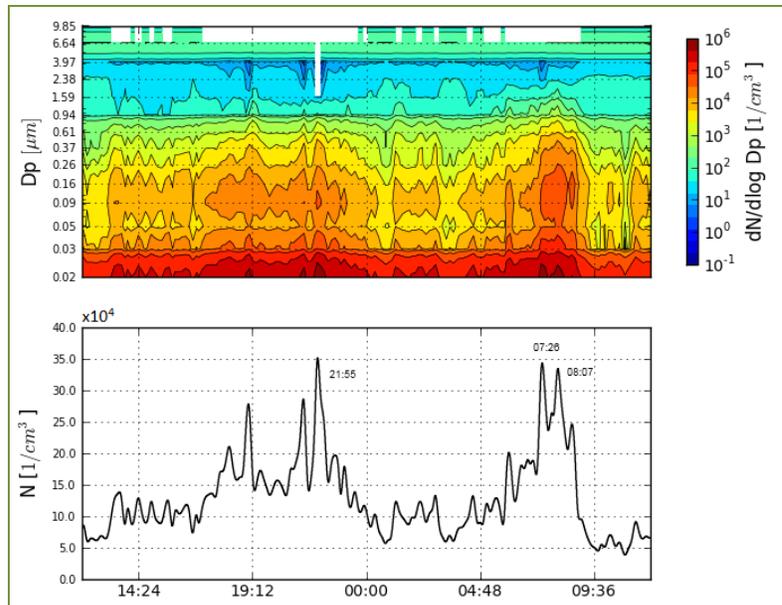


Figura 31. Perfil horario extra-domiciliario de la concentración del número de partículas (abajo) y del número de partículas separadas por fracción de diámetro aerodinámico (arriba).

## 5.2.2 Comparación de escenarios Intra-domiciliarios.

### 5.2.2.1 Niveles de contaminación por $MP_{1,0}$

Los principales datos necesarios para la evaluación del impacto generado por el programa de recambio de calefactores, a nivel intra-domiciliario, son presentados a continuación. Los datos absolutos de la concentración de  $MP_{1,0}$  registrados en cada vivienda son mostrados en la Figura 32. Durante todo el periodo de estudio, la concentración en la vivienda control (sin intervención, calefactor tipo salamandra), presentó los niveles más altos, llegando a igualarse a los niveles extra-domiciliarios. Durante la primera semana (comparación cross-sectional) una de las vivienda con calefactor de recambio presentó los niveles más altos, seguido de la casa control (ambos sobre  $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Durante la segunda semana, dos viviendas con calefactores de recambio presentaron niveles comparables entre sí ( $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  aproximadamente), en tanto que viviendas sin intervención presentaron niveles entre 20 y  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Es interesante observar que durante la tercera semana se encontraron niveles comparables entre las viviendas que estuvieron funcionando con calefactores tipo pellet ( $30$  y  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), las cuales además presentaron las menores concentraciones. A partir de este análisis surgieron las siguientes consideraciones: i) el calefactor de la casa control tiende a presentar siempre concentraciones mayores que los otros calefactores, ii) los calefactores

pertencientes al programa de recambio y los calefactores no pertenecientes al programa de recambio presentan una variabilidad importante entre las casas. iii) las estufas a pellet indicaron concentraciones comparables entre sí, y menores que los otros dispositivos encontrados.

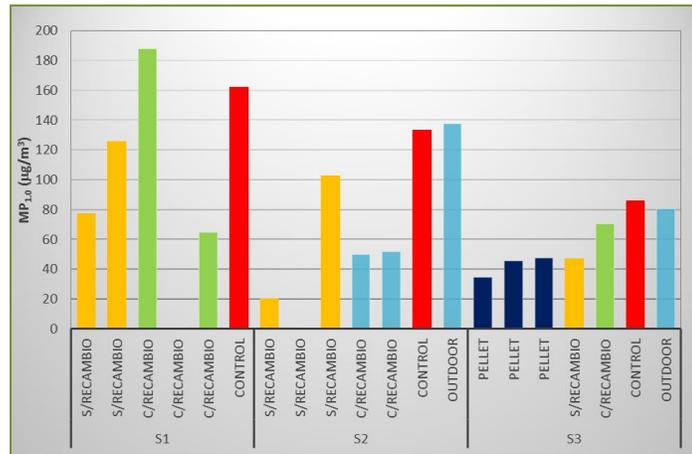


Figura 32: Concentraciones absolutas de MP<sub>1.0</sub> para los diferentes casas utilizadas.

Debido a los diferentes patrones de uso de los calefactores, se estimó necesario normalizar las concentraciones por la cantidad de combustible utilizado en cada hogar, con la finalidad de poder comparar el efecto directo proveniente del tipo de calefactor. Como se observa en la Figura 33, los kg de combustible (leña o pellet) utilizado en cada casa difirieron significativamente entre cada hogar.

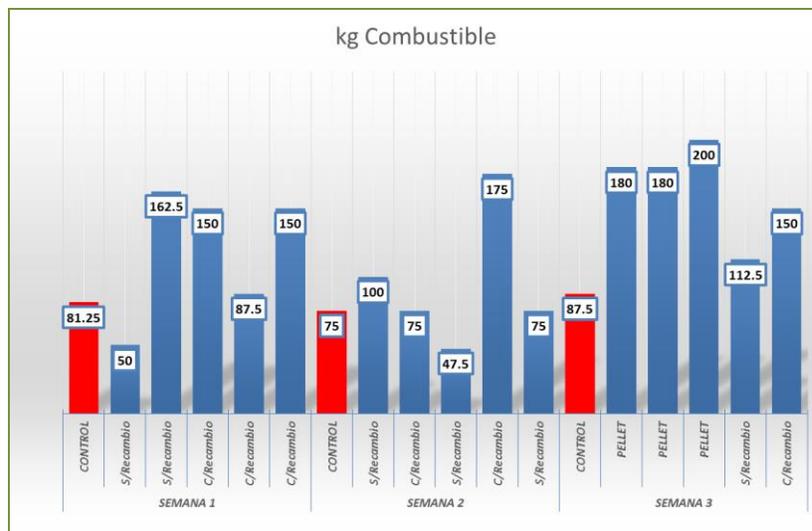


Figura 33: Kg de combustible utilizado en cada hogar durante la campaña de monitoreo.

La estadística descriptiva del monitoreo discreto efectuado, es mostrado en la Tabla 3. El color rosa indica los valores máximos entre las categorías Sin Recambio, Con Recambio, Pellet y Control. En color amarillo están los valores mínimos para las mismas categorías. En la última columna se realiza una comparación entre la concentración intra-domiciliaria máxima vs la concentración extra-domiciliaria. Respecto a la composición elemental del  $MP_{1.0}$ , en general todos los elementos son mayores dentro de los hogares, a excepción del Si y S atribuibles a partículas del suelo. Al interior de las viviendas se encontraron altos niveles de Ca, Ti, Mn e In. Las mayores concentraciones al interior de las casas se encontraron en la vivienda control (MP, CO, CE, S, Cl, K, Fe, Zn, Rb, P, y Zr), y hogares sin recambio (Na, V, Hg, In, Al, Ni). Los menores niveles tienden a encontrarse en las casas con estufas a Pellet.

Los componentes minerales de la madera pueden variar según las especie de árbol y suelo donde se desarrolló. No obstante, el material mineral de la madera generalmente es predominado por sales de K, P, Ca, Na y  $SO_4$  (Olli, 2010). Durante la combustión los iones minerales son oxidados y volatilizados hasta la formación de partículas, por lo que es probable que la mayoría de los elementos encontrados en el  $MP_{1.0}$  fueran generados casi exclusivamente de la quema del combustible. Se debe hacer notar que los calefactores a Pellet, presentaron casi todo los mínimos de las concentraciones de los elementos, a excepción de Cu, Ti y Si que pueden ser asociados a partículas generadas por la combustión del recubrimiento del calefactor.

Tabla 3: Promedios de concentración de MP<sub>1.0</sub> y especiación química para las diferentes configuraciones de viviendas (Semana 2 y 3). En la última columna se encuentra apartada de la tabla para indicar que corresponde a un coeficiente entre la concentración máxima intra-domiciliaria/extra-domiciliaria. Destacados en color rojo están los valores máximos para cada especie determinada. En color amarillo están los valores mínimos.

		Sin Recambio	Con Recambio	Pellet	Control	Outdoor	Max Indoor/outdoor
MP <sub>1.0</sub>	µg/m <sup>3</sup>	56.7	57.3	42.5	109.5	109.0	1.0
CO		17.7	12.5	12.1	36.3	32.8	1.1
CE		6.0	4.0	2.7	7.0	3.1	2.3
Si	ng/m <sup>3</sup>	133.0	276.1	285.7	115.8	368.3	0.8
S		307.1	248.5	205.1	316.6	417.8	0.8
Cl		892.2	962.0	750.2	2133.5	1111.2	1.9
K		1066.1	1360.8	1143.4	2048.8	1098.9	1.9
Ca		112.9	218.3	152.0	95.3	29.4	7.4
Fe		78.4	78.3	90.9	96.4	42.4	2.3
Zn		12.4	20.1	18.6	32.0	20.9	1.5
Na		310.3	215.6	85.0	169.9	139.3	2.2
V		10.4	1.3	1.0	3.7	5.9	1.7
Cu		2.7	8.7	9.1	8.1	3.7	2.4
Hg		32.8	30.3	13.5	30.6	12.5	2.6
Rb		6.4	6.8	5.2	6.9	5.2	1.3
In		51.4	46.3	16.9	27.0	12.4	4.2
Al		113.9	94.3	69.9	55.6	65.3	1.7
Ti		8.3	3.6	9.9	2.6	1.6	6.1
Mn		7.7	12.3	7.4	5.8	2.5	4.9
P		16.1	32.0	37.9	45.7	nd	---
Ni		10.4	4.0	1.5	nd	2.9	3.6
Pb		20.5	10.2	7.4	20.9	7.7	2.7
Zr		2.4	5.6	5.6	7.2	3.3	2.2

En la Tabla 4 se presenta el coeficiente de correlación de MP<sub>1.0</sub> con todos los parámetros considerados en el análisis. Los mayores valores se asocian al CO, S, Cl, K (R>0.8), indicando predominio de las emisiones provenientes de la combustión de biomasa (CO, Cl, y K se asocian a esta fuente). Al realizar la comparación indoor/outdoor para los distintos componentes, se encontraron mayores valores para la vivienda control (

Tabla 5). Para el CO, CE, Cl y K se observaron concentraciones que fueron 1.1, 2.3, 1.92 y 1.86 veces mayores al interior de la casa control, respectivamente. Es interesante observar que el coeficiente  $(\text{indoor/outdoor})_{\text{CO}}$  es menor a 1 en el resto de las viviendas (Sin Recambio > Con Recambio ~ Pellet). Un resultado similar se obtuvo para  $(\text{indoor/outdoor})_{\text{Cl}}$  donde se presentó el gradiente Con Recambio > Sin Recambio > Pellet. Para el coeficiente  $(\text{indoor/outdoor})_{\text{K}}$  se observan valores más cercanos a 1 en Sin Recambio y Pellet, en tanto que Con Recambio las concentraciones al interior fueron 1.24 veces más altas que en el exterior. El CE puede ser utilizado como indicador de la eficiencia de combustión, y presentó un gradiente desde la vivienda Control > Sin Recambio > Con Recambio > Pellet. Este resultado es el más importante, puesto que indica la calidad de combustión en los hogares respectivos, y por ende un parámetro del nivel de contaminación intra-domiciliaria.

Tabla 4: Coeficiente de correlación entre los distintos parámetros medidos con respecto a  $\text{MP}_{1.0}$ . Se consideraron todas las muestras. Destacados en color rojo se encuentran los 7 valores más altos.

Parámetro	R
CO	0.95
CE	0.60
TC	0.93
Si	0.50
S	0.83
Cl	0.88
K	0.86
Ca	0.28
Fe	0.54
Zn	0.71
Na	0.52
V	0.33
Cu	0.10
Hg	0.05
Rb	0.53
In	-0.02
Al	0.59
Ti	0.50
Mn	0.41
P	0.71
Ni	0.14
Pb	0.21
Zr	0.20

Tabla 5: Coeficiente indoor/outdoor para las distintas configuraciones de viviendas

	Sin Recambio	Con Recambio	Pellet	Control
MP <sub>1.0</sub>	0.52	0.53	0.39	1.00
CO	0.54	0.38	0.37	1.11
CE	1.93	1.31	0.86	2.27
Si	0.36	0.75	0.78	0.31
S	0.73	0.59	0.49	0.76
Cl	0.80	0.87	0.68	1.92
K	0.97	1.24	1.04	1.86
Ca	3.85	7.44	5.18	3.25
Fe	1.85	1.85	2.15	2.28
Zn	0.59	0.96	0.89	1.53
Na	2.23	1.55	0.61	1.22
V	1.75	0.22	0.16	0.63
Cu	0.73	2.36	2.45	2.19
Hg	2.62	2.42	1.08	2.45
Rb	1.23	1.31	1.00	1.33
In	4.16	3.74	1.37	2.18
Al	1.74	1.44	1.07	0.85
Ti	5.14	2.24	6.13	1.59
Mn	3.07	4.91	2.97	2.34
Ni	3.58	1.39	0.53	Nd
Pb	2.65	1.32	0.96	2.71
Zr	0.72	1.67	1.67	2.16

Desde el punto de vista de la composición química, y tomando en consideración que los componentes directos de evaluación de la combustión corresponde a CO, CE y K, se graficaron los resultados en las Figura 34 y Figura 36. No fue posible observar ningún patrón de comportamiento. Nuevamente las estufas a pellet presentaron los valores más estables, tanto en concentración de CO y CE, como en relación CO/CE.

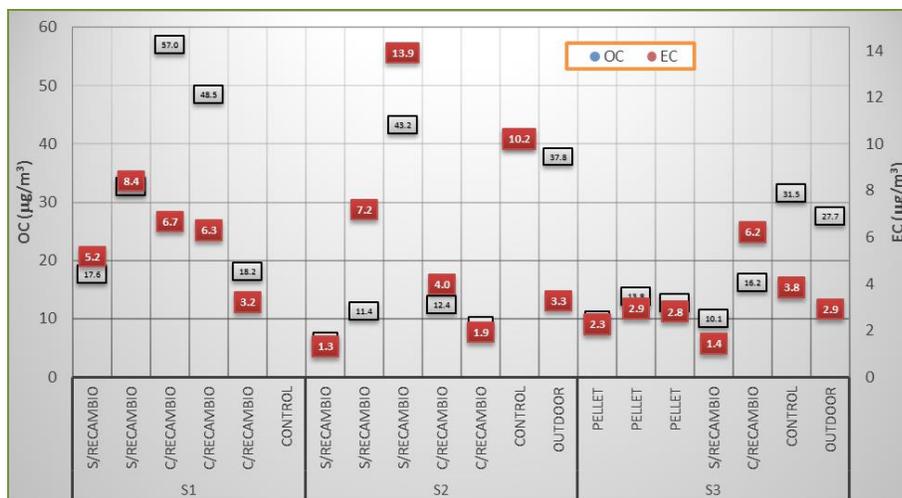


Figura 34: Concentraciones de OC (color gris) y EC (color Verde) para las distintas estufas.

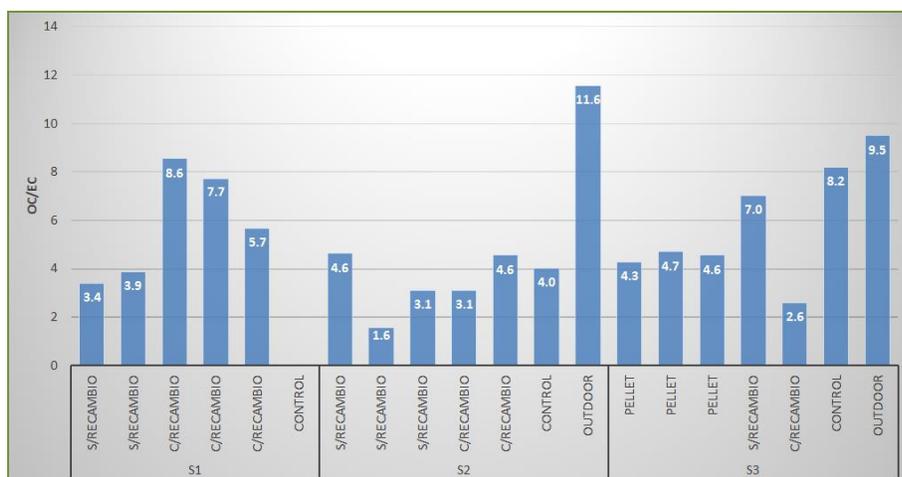


Figura 35: Relación OC/EC para los distintos calefactores y puntos control utilizados.

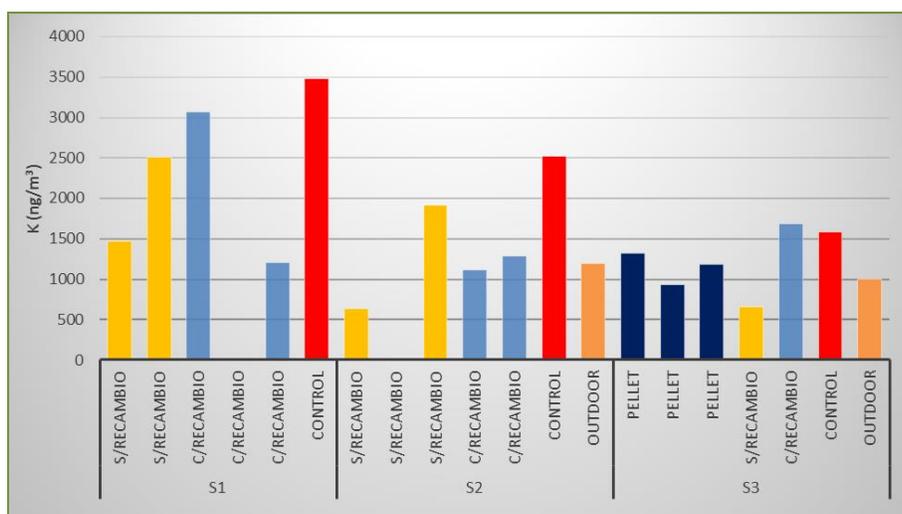


Figura 36: Concentraciones de K para las distintas estufas.

Al realizar una normalización de la concentración por la cantidad de combustible utilizado, se observó mayores valores en la casa control, y por el contrario, los menores en casas con calefactores a pellet (Figura 37). Al comparar casas con estufas de recambio contra casas con estufas no intervenidas, se observó una tendencia a presentarse menores niveles en hogares con estufas recambiadas.

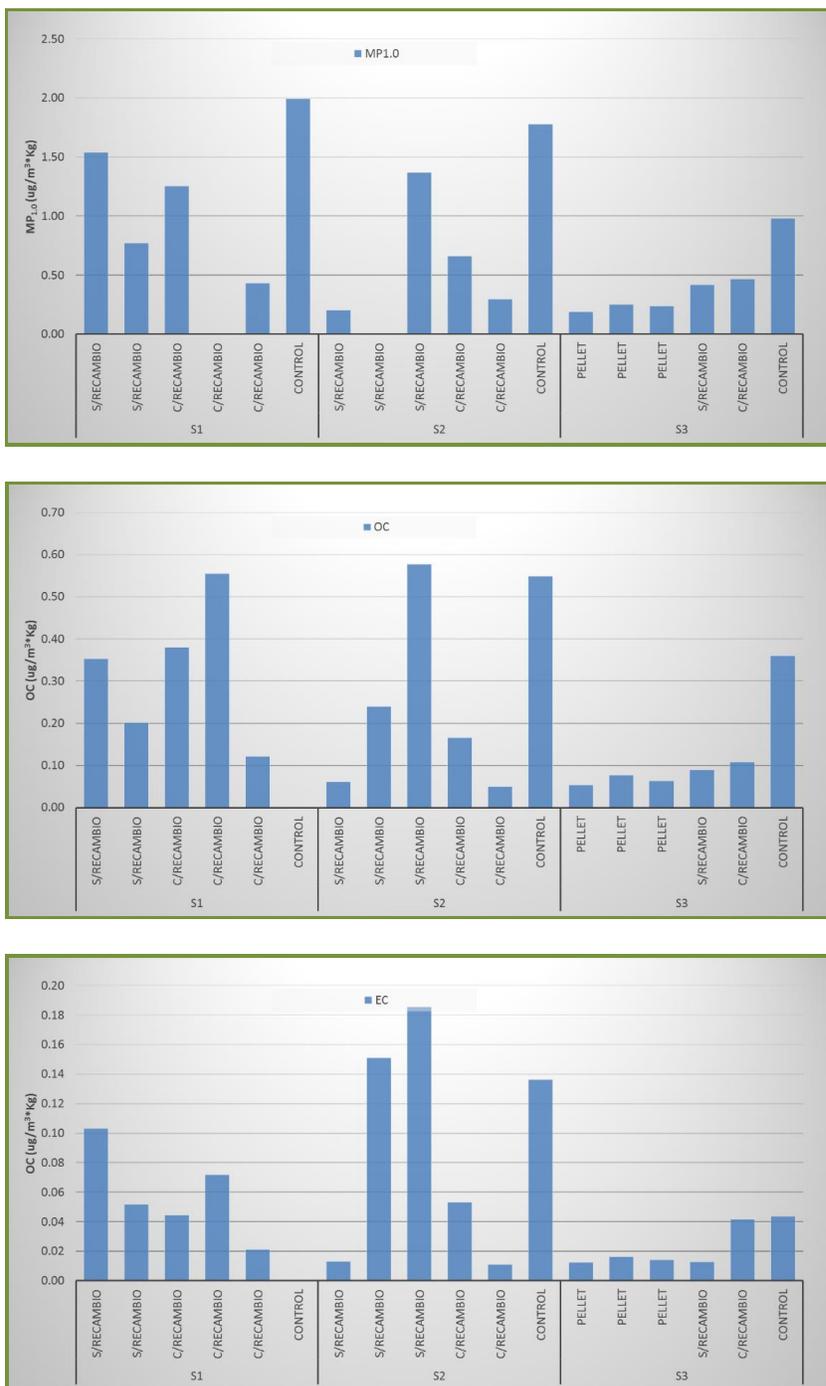


Figura 37: Concentración de MP<sub>1.0</sub>, CE y CO normalizada por el consumo de combustible.

En cuanto, a la concentración de gases, se pudo observar mayores niveles en el grupo de hogares que poseían un calefactor no perteneciente al programa de recambio. Los menores niveles se encontraron en los hogares con calefactor a pellet, mientras que un nivel intermedio se presentó en hogares con el calefactor recambiado.

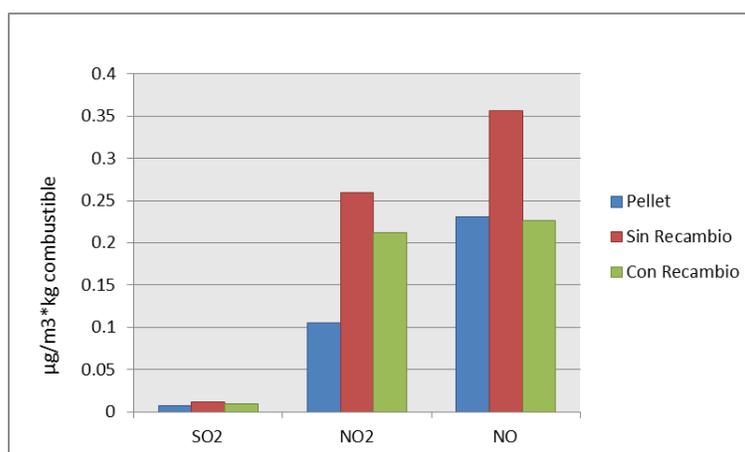


Figura 38. Concentración de gases normalizada por el consumo de combustible.

En una aproximación más avanzada, se compararon los valores correspondientes a las mediciones efectuadas durante el proceso real de intervención, es decir ex ante y ex post recambio de calefactores. Los resultados de los diferentes escenarios son mostrados en las F..

De las principales observaciones, se da cuenta de que los hogares con estufas sin recambio al ser cambiadas a pellet disminuyeron más de dos veces la concentración de CE y CO. El hogar al cual se le realizó el cambio del calefactor originalmente recambiado a un calefactor tipo pellet, también disminuyó las concentraciones de contaminantes particulados. Resalto también la disminución de contaminantes, al efectuar el recambio de un calefactor tradicional por un calefactor perteneciente al programa de recambio. En general, las concentraciones de contaminantes en este escenario, disminuyeron más del doble.

En definitiva, las casas que pasaron de un calefactor (perteneciente o no al programa de recambio) a un calefactor tipo pellet, presentaron un descenso de las concentraciones observadas previo a la intervención. No obstante, en un hogar no se observó un cambio significativo en los niveles reportados. La situación para los

calefactores sin recambio a con recambio, ilustra un descenso efectivo de los niveles, aun variando el periodo de uso y cantidad de combustible utilizado.

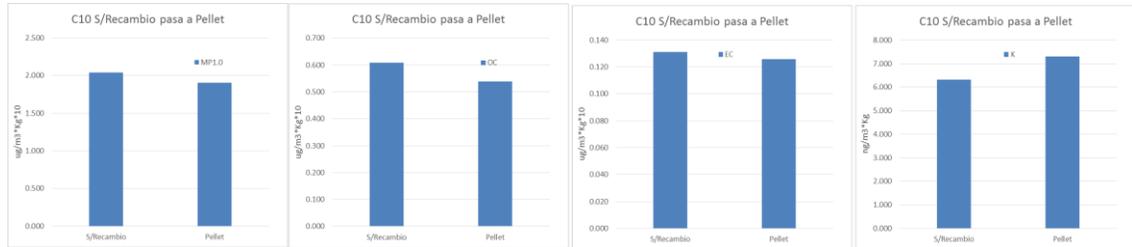


Figura 39: Intervención hogar sin recambio a calefactor tipo Pellet.

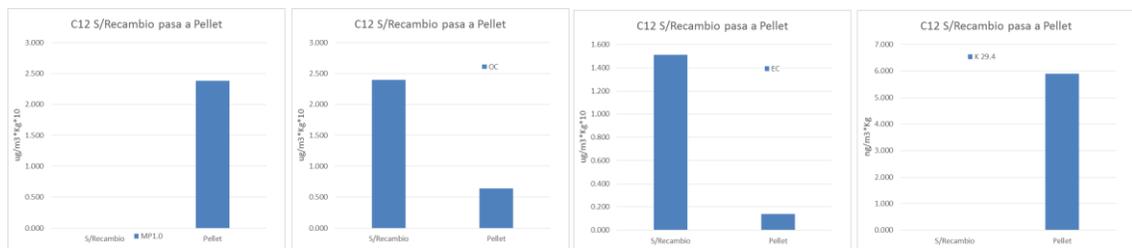


Figura 40: Intervención hogar sin recambio a calefactor tipo Pellet. Por falla representativa no se obtuvo material en el filtro del hogar sin recambio.

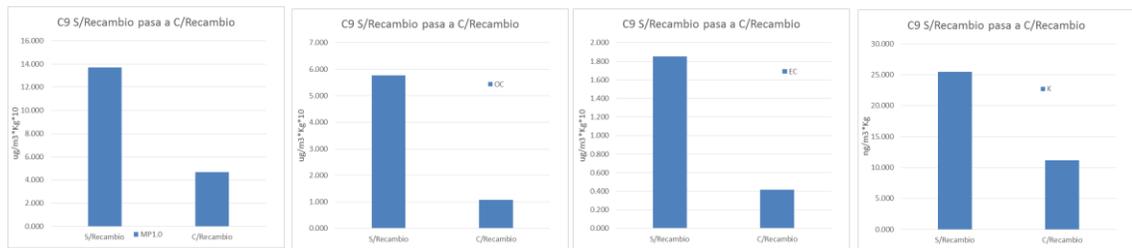


Figura 41: Intervención hogar sin a recambio de calefactor del programa.

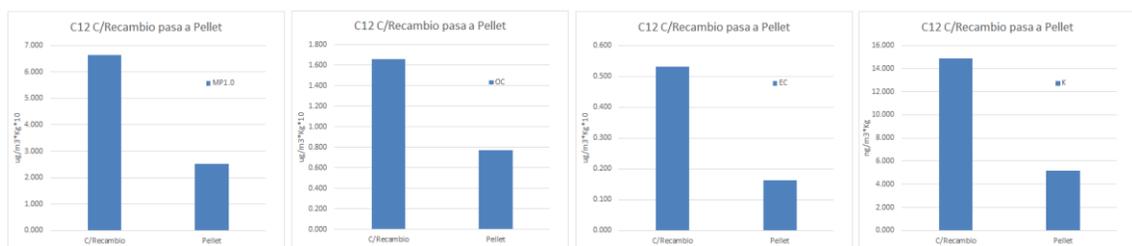


Figura 42: Intervención hogar con calefactor del programa de recambio, a tipo pellet.

Sobre las mediciones integradas de gases, se apreció que las concentraciones de NO<sub>2</sub> y NO bajaron al cambiarse un hogar con calefactor a leña por estufas a pellets, en hogares que poseían calefactores del programa de recambio, y los que no. El porcentaje promedio de disminución de contaminantes fue de 77% para el SO<sub>2</sub>, 61%

para NO<sub>2</sub>, y 65% para NO.

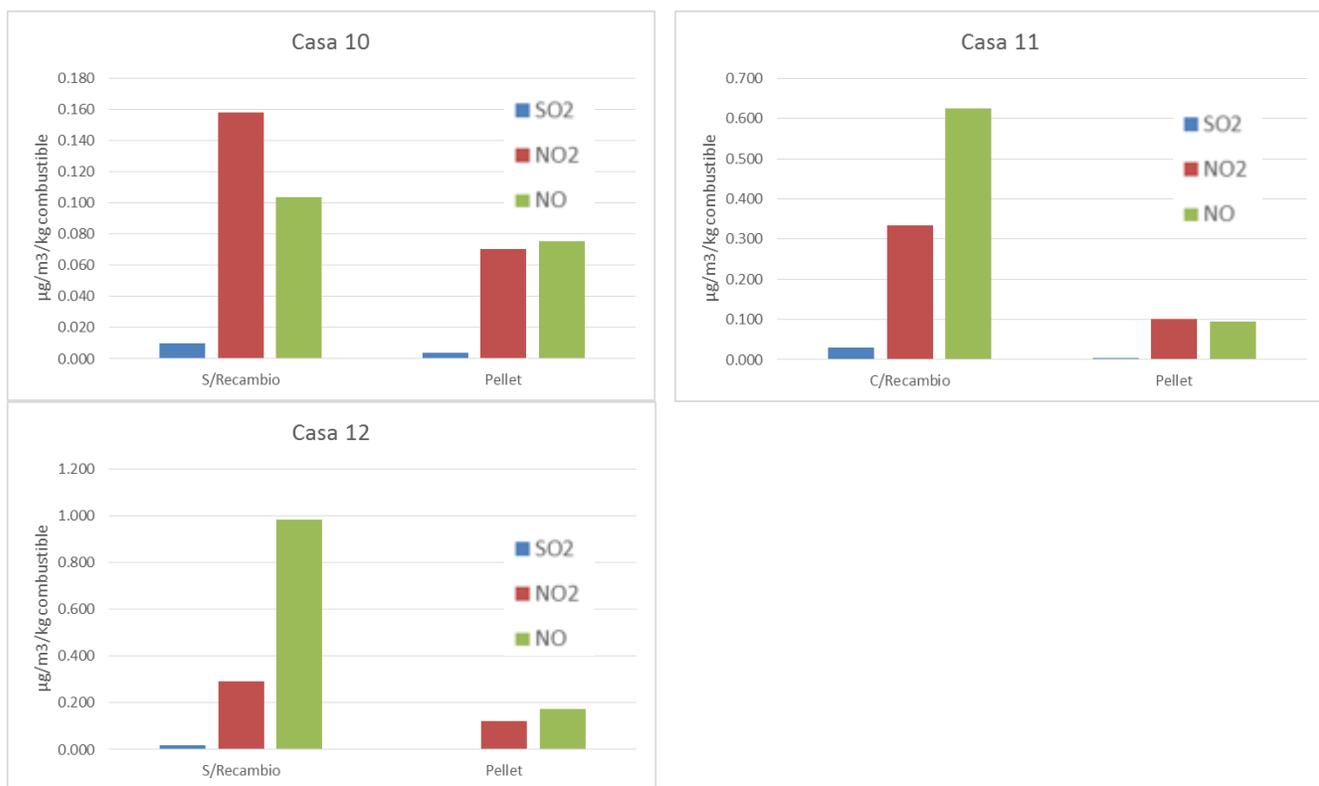


Figura 43 Concentración de SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> y NO normalizado, emitidos en escenarios previos y posteriores a recambio por estufas a pellet.

Un efecto de disminución también fue observado en el hogar con intervención del calefactor tradicional por uno del programa de recambio. En todas las mediciones integradas de los gases se observaron menores niveles en el ambiente intradomiciliario, luego de comenzar a utilizar el calefactor perteneciente al programa de recambio.

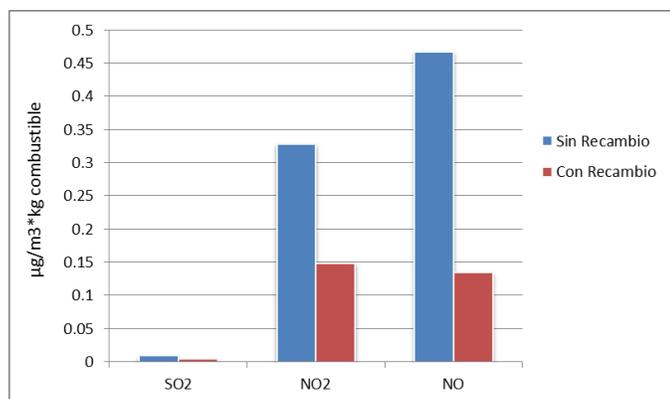


Figura 44. Comparación de los niveles de contaminantes gaseosos en el hogar previa y posterior intervención de calefactor por uno perteneciente al programa de recambio.

Al observar los niveles de MP en distintas fracciones, se notó que la cantidad máxima de partículas asociadas al encendido y mantenimiento de la combustión a leña, disminuyó luego de la intervención de un calefactor tradicional por uno perteneciente al programa de recambio. El perfil horario de la distribución de partículas, indicó que al momento de encendido, el máximo alcanzado de concentración fue menor, y casi exclusivamente en el rango de las partículas ultrafinas. La estabilidad de concentración de partículas según el rango del diámetro, también se alcanza a un menor nivel en el caso de los calefactores del programa de recambio.

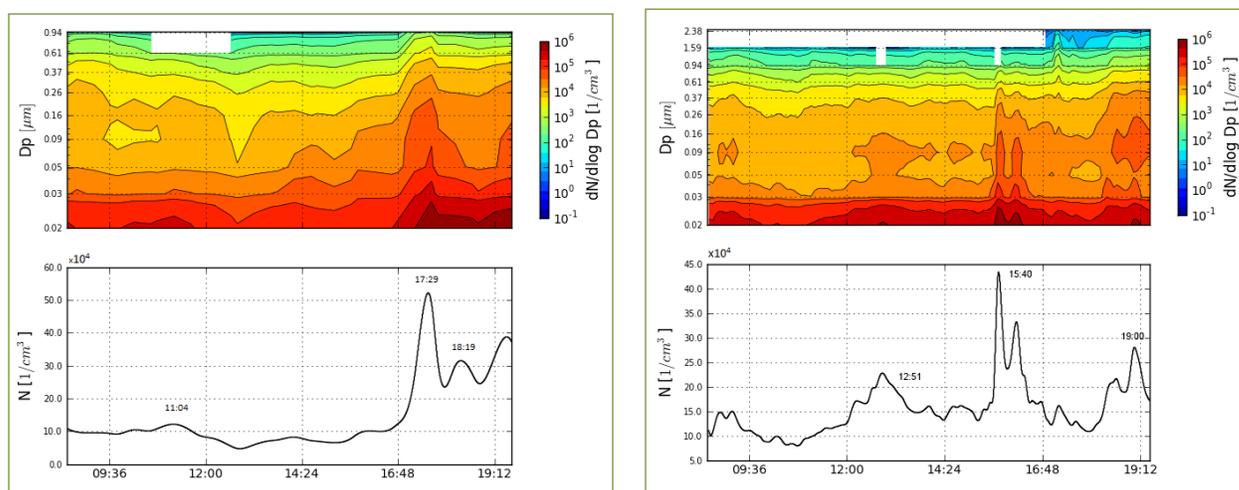


Figura 45. Perfil horario y concentración de partículas durante el periodo de uso de los calefactores a leña previo y posterior recambio.

## 6. CONCLUSIONES

---

El documento entregado presentó el desarrollo y ejecución de la campaña oficial de monitoreo para el estudio de evaluación del impacto del programa de recambio de estufas en la ciudad de Osorno. Los resultados fueron obtenidos luego de efectuar mediciones de la calidad del aire intra-domiciliario en escenarios ex ante y ex post recambio, dentro de las que se encuentran también estufas a pellet.

Las mediciones correspondieron a niveles de material particulado (MP) en distintas fracciones, material particulado de diámetro inferior a 1 micrómetro ( $MP_{1.0}$ ), carbono elemental (CE), carbono orgánico (CO), gases de óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ) y dióxido de azufre ( $SO_2$ ), los cuales se presentaron en menores niveles en los hogares que fueron sometidos al recambio de sus calefactores, en comparación a hogares que no fueron intervenidos. Todos los niveles fueron además menores a los encontrados en un hogar control, que utilizó un calefactor tipo salamandra.

De los escenarios de recambio, el realizado para cambiar calefactores a estufas de pellet, fue determinado como el óptimo, debido a que se observó una mejoría en los niveles de contaminación intra-domiciliaria. Esto incluye disminuciones a más del doble de los valores previos al recambio.

Los resultados provenientes del estudio ex ante y ex post intervención de recambio, arrojaron que la condición del aire dentro de la misma casa, mejoró al efectuar un cambio por los calefactores pertenecientes al programa de recambio implementado en tal ciudad. Si bien los resultados fueron normalizados según el patrón de consumo de combustible (distintos para cada vivienda), se observó que dentro de una misma casa, disminuyeron también la cantidad de partículas en los periodos de encendido y apagado de los calefactores.

De la situación extra-domiciliaria se constató la predominancia de partículas ultrafinas, de diámetro aerodinámico menor a  $1.0 \mu m$ , el cual se asoció además al ciclo de uso de los calefactores, es decir a ciertas horas de la mañana y tarde. Por su parte, la concentración de contaminantes extra-domiciliarios siempre fueron mayor en comparación a los niveles intra-domiciliarios. Los niveles de gases en la ciudad,

variaron según la zona.

Si bien aún falta incluir las mediciones a las emisiones directas del ducto de salida de cada calefactor, es posible vislumbrar una aparente mejoría en la calidad del aire extra-domiciliario, luego del recambio de las estufas tradicionales a otras de mejor tecnología, de las que se incluyen las de tipo pellet y las de leña de tecnología avanzada. Lo anterior considerando, que el ambiente interno del hogar efectivamente mejoró su calidad del aire producto de mejoras establecidas en los modelos de calefactores instalados.



## 7. Bibliografía

---

- Bockhorn, H. (1994). Soot formation in combustion - mechanisms and models. Berlin, Springer.
- Brauer M., L. T. (2008). Infiltration of forest fire and residential wood smoke: an evaluation of air cleaner effectiveness. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology* , 18: 503–511.
- Bruce N., P.-P. R. (2000). Indoor air pollution in developing countries: a major environmental and public health challenge. *Bull World Health Organ.*, 1078-1092.
- CNE. (2008). *Política Energética: Nuevos Lineamientos*. . Comisión Nacional de Energía.
- Edwards RD., L. Y. (2007). Household CO and PM measured as part of a review of China's National Improved Stove Program. *Indoor Air.*, 17: 189-203.
- Fullerton DG., B. N. (2008). Indoor air pollution from biomass fuel smoke is a major health concern in the developing world. *Trans R Soc Trop Med Hyg*, 102: 843-851. .
- Hays, M. D. (2002). Speciation of gas-phase and fine particle emissions from burning of foliar fuels. *Environ. Sci. Technol*, 36: 2281–2295.
- Hoel Gerard, R. M. (2013). Long-term air pollution exposure and cardio- respiratory mortality: a review. *Environmental Health*, 12:43.
- Kim KH., J. S. (2011). A review of diseases associated with household air pollution due to the use of biomass fuels. . *J Hazard Mater.*, 192: 425-432. .
- Naeher L., B. M. (2007). Woodsmoke Health Effects: A review. *Inhal. Toxicol.* , 19:67-106. .
- Olli, S. (2010). *Fine Particle Formation and Emissions in Biomass Combustion. Report Series in Aerosol Science*. Kuopio, Finlandia: University of Eastern Finland. Department of Environmental Science.
- Romieu I, R.-R. H.-M. (2009). Improved biomass stove intervention in rural Mexico: impact on the respiratory health of women. . *Am J Respir Crit Care Med*, 180:649–656.
- Ward T.J., P. C. (2008). Results of a Residential Indoor PM2.5 Sampling Program Before and After a Woodstove Changeout. *Indoor Air*, 18: 408–415.

## 8. Apéndice I

### 8.1 Anexo 1: Cuestionario de Caracterización Habitacional

#### CUESTIONARIO DE CARACTERIZACIÓN HABITACIONAL

Título del Protocolo: Estudio de Evaluación del Programa de Recambio de Calefactores a Leña.

Campaña: \_\_\_\_\_

N° Folio: \_\_\_\_\_

Fecha: \_\_\_\_\_

Consentimiento informado: (1) Sí (2) No

Coordenadas GPS: N \_\_\_\_\_ E \_\_\_\_\_

Altitud (m): \_\_\_\_\_

Entrevistador: \_\_\_\_\_

**Instrucciones:** Conteste cada pregunta encerrando en un círculo el número apropiado. Las preguntas de la sección I y II son observaciones del dueño/a de casa, y pueden ser completadas antes de la finalización del monitoreo. Las preguntas de la sección III deben ser completadas al finalizar el periodo de monitoreo. El anexo “**diario de actividades**” debe ser completado por el/la dueño/a de casa durante el periodo de monitoreo.

#### I. Observaciones del Hogar (OH):

**Encierre en un círculo y escriba en la casilla el tipo de estufa correspondiente.** Marque la ubicación de las puertas, ventanas, chimenea (si existe) y equipamiento usando los símbolos a continuación.

- A. ¿Cuántos años de antigüedad posee la casa?: \_\_\_\_\_
- B. ¿Cuántos m<sup>2</sup> construidos tiene la casa?: \_\_\_\_\_
- C. ¿Cuántos m<sup>2</sup> construidos tiene la habitación donde se ubica el calefactor?:
- D. ¿El hogar posee un sistema de aislación térmica?: (1) Sí (2) No
- E. ¿Usa leña para calefaccionar su hogar?: (1) Sí (ir a E) (2) No (ir a G) (3) NS  
Si contesta: (1) el encuestado el “Consumidor de leña” (2) “No consumidor de leña”
- F. ¿Cuánto de la calefacción del hogar proviene de leña?: (1) >90% (2) 50%-90% (3) 20-50% (4) <20% (5) NS
- G. ¿Qué tipo de estufa utiliza para quemar leña?: (1) Bracero abierto (2) Estufa de tecnología avanzada (3) estufa convencional (4) Chimenea inserta (5) otro \_\_\_\_\_
- H. Esquema de la habitación donde se ubica el calefactor:

Símbolos:

Puerta: □ (indicar principal y cocina)

Ventana: #

Chimenea: ▲

Estufa: X

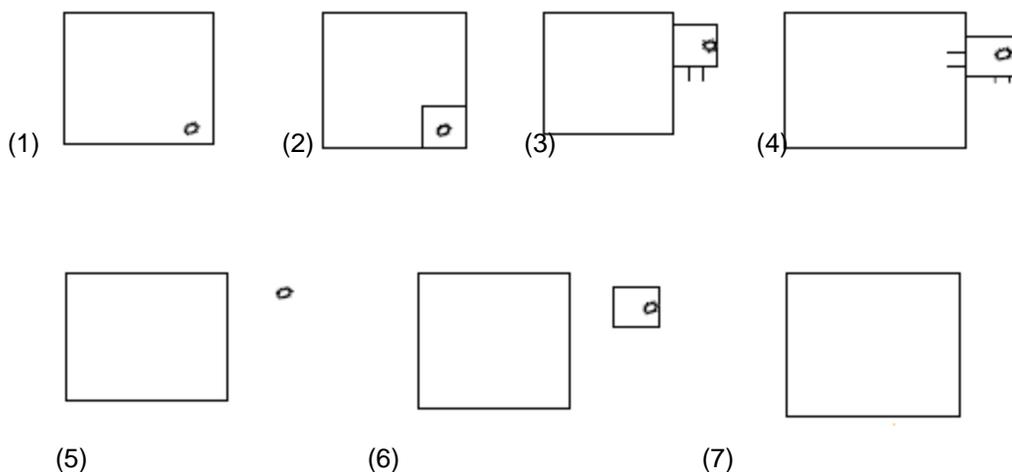
Anotar material construcción paredes



## II. Observaciones de la Cocina (OC):

Encierre en un círculo y escriba en la casilla el tipo de cocina correspondiente. Marque la ubicación de las puertas, ventanas, chimenea (si existe) y equipamiento usando los símbolos de la página anterior.

- (1) Cocina en misma habitación del calefactor
- (2) Cocina separada con puerta interior
- (3) Cocina externa con puerta exterior
- (4) Cocina externa con puerta interior y exterior
- (5) Cocina externa separada abierta
- (6) Cocina externa separada cerrada
- (7) Otra (dibujar)



- A. ¿Cuántos m<sup>2</sup> construidos tiene la cocina?: \_\_\_\_\_
- B. ¿Cuántas ventanas y puertas tiene la cocina?: ventanas \_\_\_\_\_ puertas \_\_\_\_\_
- C. ¿Usa leña para cocinar?: (1) Sí (2) No (3) NS
- D. Describir la cocina utilizada: \_\_\_\_\_
- E. El sistema de ventilación utilizado es: (1) ventana (2) ducto unido (3) ducto separado tipo campana (4) ventilador (5) otro \_\_\_\_\_ (6) no tiene
- F. ¿El humo sale del área de la cocina? (1) Sí (2) No
- G. ¿El humo entra en la habitación del calefactor? (1) Sí (2) No
- H. ¿Tiene el horno una cámara de combustión cerrada? (1) Sí (2) No
- I. ¿Existe espacio entre las murallas y el techo de la cocina? (1) Sí (2) No

### III. Observaciones del periodo de monitoreo.

A. ¿Cuál fue el tipo de combustible usado durante el periodo de monitoreo?

- (1) Leña no certificada
- (2) Leña certificada
- (3) Restos (ramas)
- (4) Kerosene
- (5) Gas
- (6) Electricidad
- (7) Otros: \_\_\_\_\_

B. ¿Tiene la estufa una bandeja de metal interior donde reposa el combustible? (1) Sí (2) No

C. ¿Tiene la estufa una cámara interna de combustión (con puerta)? (1) Sí (2) No

D. ¿Cuánto combustible usó en el periodo de monitoreo (n° leña)?: \_\_\_\_\_

E. ¿Cuál fue el tipo de combustible usado para cocinar durante el periodo de monitoreo (alternativas de pregunta A)?: \_\_\_\_\_

G. ¿Para cuantas personas se cocinó habitualmente?: \_\_\_\_\_

H. Tiempo promedio que se mantiene encendida la cocina: \_\_\_\_\_

I. ¿Algún día se cocinó para más o menos gente de lo habitual?: (1) Sí (2) No. Indicar día:

J. ¿Prendió alguna lámpara no eléctrica durante el periodo de monitoreo?: (1) Sí (2) No. Indicar combustible utilizado: \_\_\_\_\_

K. ¿Se prendieron cigarrillos dentro de la casa?: (1) Sí (2) No. Indicar número de cigarrillos: \_\_\_\_

L. ¿Se quemó basura?: (1) Sí (2) No. Indicar si fue dentro/fuera de la casa, duración (horas): \_\_\_\_\_

M. ¿Se prendieron inciensos dentro de la casa?: (1) Sí (2) No. Indicar número de incienso, día y hora: \_\_\_\_\_

N. ¿Se prendieron ahuyentadores de mosquitos dentro de la casa?: (1) Sí (2) No. Indicar número de incienso, día y hora: \_\_\_\_\_

O. ¿Existió otra fuente de combustión dentro del hogar o en el patio? (1) Sí (2) No. Describir fuente, día y hora: \_\_\_\_\_

P. ¿Existió algún disturbio con el equipo de monitoreo? (1) Sí (2) No

**Encuestador:** \_\_\_\_\_

**Fecha:** \_\_\_\_\_

**Comentarios:** \_\_\_\_\_



**DIARIO DE ACTIVIDADES**

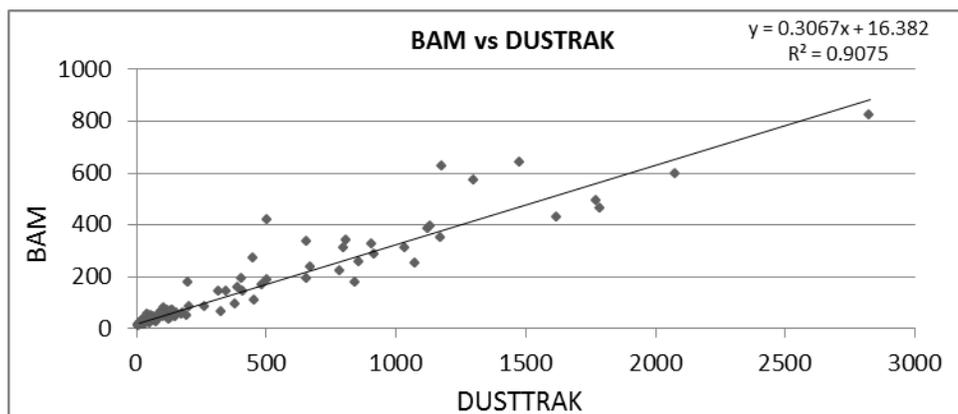
Para completar el siguiente cuadro, por favor escriba en cada columna el momento en que comenzó la actividad relleno con una línea hasta el momento en que finalizó. En caso de que la actividad haya durado menos de una hora anotar la fracción (ejemplo 8:30-8:50). Se debe incluir en la casilla la habitación en donde se realizó la actividad. En el caso de **Estufas y Cocina**, anotar la hora de encendido y apagado. En **Limpieza**, anotar el inicio y término, junto con el tipo de instrumento (escoba, aspiradora, cera, cloro, etc). En **Ventilación** indicar la hora de apertura y cierre de ventanas y puertas. En **Otros** indicar el encendido de cigarrillos, incienso, velas, lavadora, secadora, planchado, lámparas parafina, aromatizantes, fiestas, limpieza de estufa, etc.

Fecha:					
Día de la semana: Lu Ma Mi Ju Vi Sa Do					
Día de muestreo: 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31					
<b>Hora</b>	<b>Estufas</b>	<b>Cocina</b>	<b>Limpieza</b>	<b>Ventilación</b>	<b>Otros</b>
00					
1 am					
2 am					
3 am					
4 am					
5 am					
6 am					
7 am					
8 am					
9 am					
10 am					
11 am					
12 pm					
1 pm					
2 pm					
3 pm					
4 pm					
5 pm					
6 pm					
7 pm					
8 pm					
9 pm					
10 pm					
11 pm					



## 9. Apéndice II

**Dustrak:** Utilizado para monitorear  $MP_{1.0}$  y  $MP_{2.5}$  en forma continua. Se usaron los equipos Dustrak 8520 de la empresa TSI (Shoreview, Minnesota, EEUU). Este equipo opera a un flujo de 1.7 litros por minuto y usa un impactador para remover partículas sobre  $1.0 \mu m$ . Para determinar las concentraciones de partículas usa el método de dispersión de luz. Según este método, las partículas al pasar por un láser dispersan luz en forma proporcional a su diámetro. El equipo tiene un sensor de luz que permite contar tanto la cantidad de partículas como cuantificar la cantidad de luz que dispersan. De este modo calcula el volumen total de partículas en una muestra de aire. Para calcular concentraciones de material particulado el equipo Dustrak requiere ser “recalibrado” para el tipo de aerosol en estudio usando muestras integradas co-localizadas. Esto se debe a que la calibración de fábrica se realiza con un aerosol mineral de una densidad mucho mayor (alrededor de 2.5 veces) a la densidad de un aerosol urbano. Es habitual que las mediciones sean “recalibradas” en terreno contra mediciones de masa o mediciones en tiempo real con equipos de atenuación.



*Calibración efectuada con los datos de  $MP_{2.5}$  del equipo de monitoreo BAM de la estación El Alba.*

**HOBO:** Para determinar el ciclo de uso de los calefactores y la temperatura en el exterior se utilizarán monitores HOBO 8, datalogger que son capaces de registrar temperatura y humedad relativa. Son capaces de grabar con frecuencia de hasta 1

segundo y utiliza baterías reemplazables.

**MicroAeth:** Es un monitor portátil que mide la tasa de cambio de absorción de luz debido al depósito continuo de aerosoles sobre un filtro. Las mediciones se realizan a 880nm lo que se interpreta como concentración de 'black carbon' o carbono elemental. Tiene una resolución 1s, 1 o 5 min y su bomba interna puede ser regulada a 50, 100 o 150 mL/min. Es capaz de almacenar data de hasta 1 mes en su memoria con una resolución de 5min. Para muestrear utiliza un inlet de 2.5 µm. Los datos fueron validados utilizando un algoritmo escrito en MATLAB que permite filtrar y eliminar los valores asociados a errores en la medición, como valores de estatus sobre 0 que entrega la hoja de datos descargada desde el instrumento.

**ELPI+:** El Impactador Eléctrico de Baja Presión es un instrumento que mide concentraciones de material particulado y lo clasifica según el diámetro de las partículas. Esta medición se realiza de forma indirecta, es decir el instrumento no mide concentraciones directamente, sino que mide la corriente de las partículas que se depositan en cada impactador, para luego ser calculados a través de un software (ELPI VI). Para minimizar el tamaño del archivo de datos que entrega el instrumento, solo se pueden descargar las corrientes medidas, de forma que el usuario debe obtener las concentraciones mediante los programas suministrados junto al instrumento, o utilizando las ecuaciones que relacionan estas variables. El instrumento se dejó configurado para una auto-calibración eléctrica cada cierto tiempo (auto-zero), según las recomendaciones del equipo. Esto produce que se mida concentraciones muchas más pequeñas mientras sucede. Otras fuentes de error son que las partículas pueden estar cargadas antes de entrar al impactador, lo que produce que no se mida la corriente de forma correcta o se mida corrientes negativas. Para la eliminación y procesamiento de estos, se utilizó el programa ELPI VI junto a un algoritmo escrito en Python que permite filtrar valores erróneos. Este algoritmo calcula cada 8 datos el cociente entre la desviación estándar y el promedio, y si este cociente es mayor a 0.1, es decir si el error respecto al promedio es más de un 10%, elimina el dato.

$$\frac{\Delta x}{\bar{x}} > 0.1 = \text{dato eliminado}$$



**Harvard Impactor:** En este equipo el aire es succionado por una bomba, y pasa a través de un orificio (“nozzle”) donde el flujo de aire, y las partículas son acelerados. A la salida del orificio, el flujo es dirigido a un impactador, donde el flujo se desvía siguiendo una trayectoria definida. Las partículas también se desvían siguiendo el flujo del aire, pero el ángulo de desviación depende de la masa de la partícula y de su velocidad. Las partículas más pesadas se desvían menos y chocan con la placa, adhiriéndose a ella, mientras las partículas más livianas siguen el flujo de aire y pueden pasar sin chocar para luego ser colectadas en el filtro. El impactador usado en este estudio fue diseñado para captar las partículas menores o igual a  $1,0 \mu\text{m}$  en diámetro aerodinámico cuando es operado a un flujo de 4 litros por minuto. Para maximizar la eficiencia, en este estudio el muestreador se operó con dos impactadores en línea y el flujo se revisó diariamente para asegurarse que se mantuviera al valor recomendado por el fabricante (flujómetro digital Challenger, BGI). Luego de los impactadores, el flujo de aire es dirigido a la base del impactador que permite albergar un soporte para filtro de 37 mm. Este soporte puede contener tanto filtros de teflón como filtros de cuarzo. El muestreador termina en una salida que permite la rápida conexión y desconexión a una manguera que conecta los muestreadores con las válvulas y bombas. Se utilizaron filtros dobles de cuarzo según la metodología QBQ, que se mantuvieron en condiciones de oscuridad y baja temperatura hasta los posteriores análisis químicos.

**Protocolo QA/QC Combustible:** La unidad de leña fue caracterizada como el “leño” o “astilla” que cumple los parámetros dictados por el Sistema Nacional de Certificación de Leña (SNCL), que exige dimensiones aproximadas de 16x30 cm para el “leño” (ilustración adjunta). Como la leña es de carácter certificada, la diferencia de masa entre cada unidad es marginal y se asume que no afecta mayormente los resultados de las mediciones, al ser todas de la misma especie de árbol.

