



# **Antecedentes para el Análisis General de Impacto Económico y Social del Anteproyecto de la Norma de Calidad Primaria para PM<sub>2.5</sub> (AGIES)**

Estudio realizado para la Comisión Nacional del Medio Ambiente

DICTUC SA  
División de Medio Ambiente

**INFORME FINAL**  
Santiago, 5 de Mayo de 2009

## Contenidos

<b>RESUMEN EJECUTIVO</b>	<b>1</b>
SITUACIÓN DEL MATERIAL PARTICULADO EN CHILE	3
ALTERNATIVAS DE NORMA EVALUADAS	4
ANÁLISIS DE RIESGOS INDIVIDUALES	7
ANÁLISIS DE LOS COSTOS Y BENEFICIOS SOCIALES DE LA APLICACIÓN DE LA NORMA	8
ETAPA 1: DETERMINACION DE LA NORMA ACTIVA Y DE LA REDUCCIÓN DE CONCENTRACIONES REQUERIDA	9
ETAPA 2: ESTIMACION DEL BENEFICIO SOCIAL DE LA REDUCCION DE CONCENTRACIONES	11
ETAPA 3: ESTIMACIÓN DE COSTOS	14
RESULTADOS	16
CONCLUSIONES	22
<b>1. ANTECEDENTES</b>	<b>1</b>
1.1 OBJETIVOS DEL ESTUDIO	3
1.1.1 <i>Objetivos Especificos</i>	3
1.2 ORGANIZACIÓN DEL INFORME	4
<b>2. ALTERNATIVAS Y CONSIDERACIONES SOBRE NORMATIVA DE PM<sub>2,5</sub></b>	<b>5</b>
2.1 ALTERNATIVAS DE NORMA A ANALIZAR	5
2.1.1 <i>Norma diaria</i>	6
2.2 TEMAS TRANSVERSALES CON RESPECTO A LA NORMA	7
2.2.1 <i>Gradualidad</i>	7
2.2.2 <i>Planes de Prevención y Descontaminación</i>	9
<b>3. SITUACIÓN DEL MATERIAL PARTICULADO EN CHILE</b>	<b>10</b>
3.1 INFORMACIÓN BASE DE CONCENTRACIONES DE PM <sub>10</sub> Y PM <sub>2,5</sub> EN CIUDADES DE CHILE	11
3.2 CONCENTRACIONES MEDIAS ANUALES	11
3.3 RAZÓN ENTRE PM <sub>2,5</sub> Y PM <sub>10</sub>	13
<b>4. METODOLOGÍA UTILIZADA EN EL ESTUDIO</b>	<b>14</b>
4.1 RIESGOS INDIVIDUALES	15
4.1.1 <i>Reducción de casos anuales</i>	18
4.2 ANÁLISIS COSTO - BENEFICIO	19
4.2.1 <i>Cálculo de Costos y Beneficios para Cada Caso</i>	19
4.2.2 <i>Beneficios</i>	25
4.2.3 <i>Costos</i>	27
<b>5. NORMA DIARIA DE MATERIAL PARTICULADO FINO</b>	<b>33</b>
5.1 GESTIÓN DE EPISODIOS CRÍTICOS	36
<b>6. RESULTADOS</b>	<b>37</b>
6.1 REDUCCIÓN DE CONCENTRACIONES	37
6.2 EXPOSICIÓN Y CASOS EVITADOS	37
6.3 INCERTIDUMBRE DE COSTOS Y BENEFICIOS	39
6.4 VALOR PRESENTE DE COSTOS Y BENEFICIOS	41
6.5 VALOR PRESENTE DEL BENEFICIO NETO	43
6.6 NORMA DE PM <sub>10</sub> VS. NORMA PM <sub>2,5</sub>	47
6.7 ANÁLISIS DISTRIBUTIVO DE COSTOS POR CIUDAD	48

<b>7. CONCLUSIONES</b>	<b>52</b>
<b>8. REFERENCIAS</b>	<b>54</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>60</b>
<b>ANEXO I. ESTUDIOS QUE HAN SERVIDO DE APOYO A LA DICTACIÓN DE NORMAS</b>	<b>61</b>
I.1 ESTUDIOS EN USA	61
I.2 ESTUDIOS LATINOAMERICANOS	62
I.3 OTROS ESTUDIOS RELEVANTES	64
<b>ANEXO II. ANTECEDENTES DE NORMAS INTERNACIONALES</b>	<b>66</b>
II.1 GUÍAS DE LA OMS	66
II.2 NORMATIVA DE LA UNIÓN EUROPEA	69
II.2.1 <i>Guía de 1999</i>	69
II.2.2 <i>Guía de 2008</i>	70
II.3 RESUMEN DE NORMAS	70
<b>A CONTINUACIÓN SE RESUME LA NORMATIVA INTERNACIONAL PARA EL PM10 Y PM2.5 EN LA TABLA 0-5.</b>	<b>70</b>
II.3.1 <i>Valores de Normas</i>	72
II.3.2 <i>Plazos de implementación</i>	72
II.4 GESTIÓN DE EPISODIOS CRITICOS EN ESTADOS UNIDOS	73
<b>ANEXO III. ENFOQUE DE LA REGULACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO FINO DE LA DIRECTIVA 2008 DE LA UNIÓN EUROPEA</b>	<b>78</b>
III.1 VALOR LÍMITE DE CONCENTRACIÓN DE PM <sub>2.5</sub>	78
III.2 VALOR LÍMITE DE EXPOSICIÓN	79
III.3 VALOR OBJETIVO	79
III.4 META NACIONAL DE REDUCCIÓN DE LA EXPOSICIÓN A PM <sub>2.5</sub>	79
<b>ANEXO IV. INFORMACIÓN DE CALIDAD DEL AIRE EN CHILE</b>	<b>81</b>
IV.1 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE CONCENTRACIONES AMBIENTALES POR CIUDAD	81
<b>ANEXO V. ANALISIS DE SENSIBILIDAD</b>	<b>83</b>
8.1 IMPUTACION DE CONCENTRACIONES A CIUDADES SIN DATOS	83
<b>ANEXO VI. PROYECCIÓN DE EMISIONES Y CONCENTRACIONES</b>	<b>85</b>
VI.1 RELACIÓN ENTRE EMISIONES Y CONCENTRACIONES	85
VI.2 PROYECCIÓN DE CONCENTRACIONES AMBIENTALES	88
<b>ANEXO VII. IMPACTOS EN SALUD DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA POR MATERIAL PARTICULADO</b>	<b>89</b>
VII.1 EFECTOS DEL MATERIAL PARTICULADO	89
VII.2 ESTUDIOS EPIDEMIOLÓGICOS	90
<b>ANEXO VIII. METODOLOGÍA PARA ESTIMACIÓN DE RIESGOS Y BENEFICIOS</b>	<b>93</b>
VIII.1 EVALUACIONES DE IMPACTO EN LA SALUD	94
VIII.1.1 <i>El método de la función de daño</i>	95
VIII.1.2 <i>Funciones Concentración-Respuesta</i>	95
VIII.1.3 <i>Agregación de efectos</i>	98
VIII.1.4 <i>Valoración de efectos en salud</i>	98
VIII.1.5 <i>Valoración de Beneficios</i>	102

<b>ANEXO IX.</b>	<b>METODOLOGÍA DE ESTIMACIÓN DE COSTOS</b>	<b>104</b>
IX.1	IDENTIFICACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE FUENTES	104
IX.2	ASIGNACIÓN DE MEDIDAS POR FUENTE	105
IX.3	REDUCCIÓN DE EMISIONES Y CONCENTRACIONES	108
IX.4	CURVAS DE COSTO	109
IX.5	PROYECCIÓN DE LAS CURVAS DE COSTOS	114
IX.6	CURVAS DE COSTO POR CIUDAD	115
IX.7	ANÁLISIS DISTRIBUTIVO DE COSTOS	117
IX.7.1	<i>Análisis distributivo por ciudad y alternativa de norma</i>	117
<b>ANEXO X.</b>	<b>ANÁLISIS DE CONCENTRACIONES DE PM<sub>2,5</sub> EN SANTIAGO</b>	<b>124</b>
<b>ANEXO XI.</b>	<b>MONITOREO</b>	<b>131</b>
XI.1	CRITERIOS DE LA COMISIÓN DE LA COMUNIDAD EUROPEA	131
XI.1.1	<i>Establecimiento de monitores</i>	131
XI.1.2	<i>Número Mínimo de Puntos de Muestreos</i>	132
XI.2	APLICACIÓN A CHILE	134
<b>ANEXO XII.</b>	<b>INVENTARIOS DE EMISIONES Y FACTORES EMISION- CONCENTRACION UTILIZADOS</b>	<b>136</b>
<b>ANEXO XIII.</b>	<b>CONTRIBUCIÓN POR SECTOR EN CONCENTRACIONES DE PM<sub>2,5</sub></b>	<b>140</b>
<b>ANEXO XIV.</b>	<b>RESULTADOS DETALLADOS POR CIUDAD</b>	<b>141</b>
<b>ANEXO XV.</b>	<b>MEMORIA DE CÁLCULO</b>	<b>147</b>
<b>ANEXO XVI.</b>	<b>DETALLE DE FUENTES</b>	<b>148</b>

## Lista de tablas

Tabla 1-1: Relación entre la fracción fina y gruesa del PM <sub>10</sub> por Zona de Chile .....	3
Tabla 1-2: Alternativas de norma anual para PM <sub>2.5</sub> (promedio tri-anual, µg/m <sup>3</sup> ).....	5
Tabla 1-3: Alternativas de norma diaria evaluadas.....	6
Tabla 1-4: Aumento de riesgo de mortalidad prematura por causas cardiopulmonares en adultos mayores de 65 años para cuatro ciudades en estudio.....	7
Tabla 1-5: Aumento de Esperanza de Vida (meses) para hombres y mujeres por reducción de PM <sub>2.5</sub> .....	8
Tabla 1-6: Reducción de casos en exceso por cada millón de personas por µg/m <sup>3</sup> de PM <sub>2.5</sub> , promedio nacional.....	12
Tabla 1-7: Beneficios Unitarios por persona por cada µg/m <sup>3</sup> reducido de PM <sub>2.5</sub> . Promedio Nacional (dólares de 2007).....	13
Tabla 1-8 Beneficios no Cuantificados ni valorizados en el Estudio .....	13
Tabla 1-9: Inventarios ocupados en el estudio.....	14
Tabla 1-10: Casos Totales Evitados en el Período 2012-2041 (Miles de casos) y costos por alternativa de norma (Millones de USD).....	17
Tabla 1-11: Aumento Promedio de Esperanza de Vida considerando un promedio de vida de 80 años (meses).....	17
Tabla 1-12: Valor presente de los costos y beneficios por período(percentil 50, Millones de US\$) .....	18
Tabla 1-13: Costo de Reducción Anual por Periodo de tiempo (Millones de USD por año).....	20
Tabla 1-14 Beneficio Neto para las distintas alternativas de norma analizadas (Millones de US\$) .....	20
Tabla 1-15: VP de los Beneficios y Costos distribuidos por agente económico (Millones de USD) .....	21
Tabla 2-1: Alternativas de norma analizadas (valores anuales en µg/m <sup>3</sup> ) .....	5
Tabla 2-2 Alternativas de Norma Diaria.....	6
Tabla 3-1: Relación éntrela fracción fina y gruesa del PM <sub>10</sub> por zona de Chile .....	13
Tabla 4-1: Riesgo Individual causas respiratorias y cardiovascular en Adultos mayores de 65 años para cuatro ciudades en estudio. Causa Cardiopulmonar .....	16
Tabla 4-2: Riesgo en exceso para cuatro ciudades en estudio. Adultos mayores de 65 años.....	16
Tabla 4-3: Reducción Esperanza de vida (meses) de hombres y mujeres .....	17
Tabla 4-4: Impactos en Salud Considerados en el Estudio.....	18
Tabla 4-5: Reducción de casos por millón de personas por ug/m <sup>3</sup> de PM <sub>2.5</sub> reducido .....	19

Tabla 4-6 Beneficios no Cuantificados ni valorizados en el Estudio .....	26
Tabla 4-7: Beneficios unitarios estimados para 2009 (US\$/Persona* $\mu\text{g}/\text{m}^3$ PM <sub>2.5</sub> ) .....	27
Tabla 4-8: Inventarios de emisiones ocupados en el estudio.....	28
Tabla 4-9 Número de Monitores requeridos a Nivel Nacional.....	30
Tabla 4-10 Número de ciudades declaradas como zona saturada por alternativa evaluada .....	31
Tabla 4-11 Costos Declaración Zona Saturada para las ciudades afectadas por la implementación de la norma de PM <sub>2.5</sub> (MUSD).....	32
Tabla 5-1 Niveles de Concentración Diaria de PM <sub>2.5</sub> recomendada por la OMS .....	33
Tabla 5-2 Número de días superación de norma sin norma anual de PM <sub>2.5</sub> para áreas metropolitanas de Chile que cuentan con datos de monitoreo.....	34
Tabla 5-3 Número de días superación de norma para monitores de Chile con norma anual de PM <sub>2.5</sub> de 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .....	35
Tabla 5-4 Número de días superación de norma para monitores de Chile con norma anual de PM <sub>2.5</sub> de 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .....	35
Tabla 5-5 Límites para gestión de episodios críticos en base a propuesta OMS.....	36
Tabla 6-1: Casos Totales Evitados en el Período 2012-2041 (Miles de casos) y costos por alternativa de norma (Millones de USD).....	38
Tabla 6-2: Aumento Promedio de Esperanza de Vida considerando un promedio de vida de 80 años (meses).....	38
Tabla 6-3: Valor presente de los costos y beneficios (percentil 50) (MUS\$) por período .....	41
Tabla 6-4: Costo de Reducción Anual (Millones de USD por año) .....	42
Tabla 6-5 Beneficio Neto por alternativa de norma analizada (MUSD) .....	44
Tabla 6-7: Distribución de costos por alternativa de norma y sector .....	48
Tabla 6-8: Costos Totales por alternativa de norma y sector (Millones de USD/año).....	49
Tabla 6-9: VP de los Beneficios y Costos por agente económico (Millones de USD/año).....	50
Tabla 0-1: Principales Estudios realizados en USA .....	61
Tabla 0-2: Resumen Estudios Latinoamericanos.....	62
Tabla 0-3: Otros Estudios relevantes .....	64
Tabla 0-4: Recomendaciones de calidad del aire de la OMS y objetivos intermedios para el material particulado .....	67
Tabla 0-5: Resumen normativa internacional para PM <sub>10</sub> y PM <sub>2.5</sub> .....	71
Tabla 0-6: Criterio de excedencia normativa de PM <sub>2.5</sub> .....	71
Tabla 0-7: Resumen normativa de Estados Unidos para PM <sub>10</sub> y PM <sub>2.5</sub> .....	72
Tabla 0-8: Calendario Aplicación Norma PM <sub>2.5</sub> USEPA.....	73

Tabla 0-9: Escala índice de Calidad del Aire de Estados Unidos para contaminantes ambientales normados.....	74
Tabla 0-10: Valores, categorías y colores asociados al índice de calidad del aire AQI .....	75
Tabla 0-11: Escala actual y revisiones propuestas al índice de Calidad del Aire del PM <sub>2.5</sub> en EEUU.....	76
Tabla 0-12: Valor Límite de Concentración para PM <sub>2.5</sub> establecido por la Directiva de la Comisión de la Comunidad Europea (valores anuales en µg/m <sup>3</sup> ).....	78
Tabla 0-13: Meta Nacional de reducción para PM <sub>2.5</sub> establecido por la Directiva de la Comisión de la Comunidad Europea.....	80
Tabla 0-14: Valor presente de los costos y beneficios (percentil 50) (MUS\$) por período para escenarios modelados.....	83
Tabla 0-15 Beneficio Neto en sus percentiles 10, 50 y 90 para ambos escenarios analizados.....	84
Tabla 0-16: Relaciones consideradas entre los contaminantes primarios y secundarios.....	87
Tabla 0-17: Factores Emisión-Concentración (FEC) para PM <sub>2.5</sub> utilizados en el presente estudio ((ton/año)/(µg/m <sup>3</sup> )).....	88
Tabla 0-18: Efectos en la salud que han sido relacionados con la contaminación atmosférica....	89
Tabla 0-19: Riesgo relativo según nivel educacional de acuerdo al re-análisis del estudio de la ACS (por cada 10µg/m <sup>3</sup> de aumento de PM <sub>10</sub> , adultos mayores de 30 años) .....	92
Tabla 0-20: Efectos en la salud cuantificables relacionados con la contaminación atmosférica..	98
Tabla 0-21: Efectos en la salud valorizables relacionados con la contaminación atmosférica ....	99
Tabla 0-22: Valores unitarios de WTP transferidos de estudios en Latinoamérica (US\$ per 1000 \$IPC).....	100
Tabla 0-23: Valores de costos médicos basados en estimaciones COI para Latinoamérica (US\$ per caso para PPPI de \$1000) .....	101
Tabla 0-24: Duración promedio de enfermedades clasificadas en la categoría de admisiones hospitalarias (días por caso).....	102
Tabla 0-25: Beneficios unitarios estimados para 2009 (US\$/Persona* µg/m <sup>3</sup> PM <sub>2.5</sub> ).....	103
Tabla 0-26: Inventarios ocupados en el estudio.....	104
Tabla 0-27 Clasificación Tipos de Fuentes Inventarios de Emisiones .....	105
Tabla 0-28: Medida aplicada por fuente emisora: Fuentes Móviles.....	106
Tabla 0-29: Medida aplicada por fuente emisora: Fuentes Fijas .....	107
Tabla 0-30: Medida aplicada por fuente emisora: Fuentes Fugitivas.....	108
Tabla 0-31: Resultados Ajuste Cúbico a Curvas de Costo .....	111
Tabla 0-32: Curvas de costo total por ciudad (US\$-año) .....	112
Tabla 0-33: Resultados Ajuste Cúbico a Curvas de Costo .....	114
Tabla 0-34: Reducciones máximas requeridas por ciudad para PM <sub>2.5</sub> .....	118

Tabla 0-35: Reducciones alcanzadas por percentil y ciudad ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).....	118
Tabla 0-36: Distribución de costos (%) por sector por percentil de reducción de $\text{PM}_{2.5}$ , ciudad: Calama .....	119
Tabla 0-37: Valor Presente de costos nacional por sector (Millones USD/año) .....	120
Tabla 0-38: Distribución de costos por alternativa de norma, ciudad y sector.....	121
Tabla 0-39: Zonas para la ciudad de Santiago definidas en base a criterios socio económicos. 127	
Tabla 0-40: Tasa de Mortalidad por grupo de edad y concentración ponderada de $\text{PM}_{2.5}$ por zona socioeconómica para Santiago .....	129
Tabla 0-41: Matriz de Correlación Tasa de mortalidad – Nivel socioeconómico y Concentración de $\text{PM}_{2.5}$ para Santiago .....	129
Tabla 0-42: Número de monitores mínimos para medición de material particulado de acuerdo a la Directiva de la Comisión de la Comunidad Europea.....	133
Tabla 0-43 Número de monitores mínimos para medición de material particulado en Chile de acuerdo a criterio de la Directiva de la Comisión de la Comunidad Europea .....	135
Tabla 0-44: Inventarios utilizados de emisión por ciudad y sector (ton/año).....	137
Tabla 0-45: Inventarios utilizados de emisión por ciudad y sector (ton/año).....	138
Tabla 0-46: Factores Emisión-Concentración (FEC) para cada ciudad (ton/ $(\mu\text{g}/\text{m}^3)$ ) .....	139
Tabla 0-47: Reducciones requeridas por ciudad ( $\text{ug}/\text{m}^3$ ).....	141
Tabla 0-48: Beneficio por ciudad para escenario de beneficios alto. ....	142
Tabla 0-49: Beneficio por ciudad para escenario de beneficios bajo .....	143
Tabla 0-50: Costo por ciudad para escenario de beneficios alto. ....	144
Tabla 0-51: Costo por ciudad para escenario de beneficios bajo.....	145

## Lista de figuras

Figura 1-1: Promedio anual de concentraciones de material particulado por área metropolitana..	4
Figura 1-2: Alternativas de norma anual para $PM_{2.5}$ (promedio tri-anual, $\mu g/m^3$ ) .....	6
Figura 1-3: Reducción de concentraciones requerida cuando la caso norma diaria es activa .....	9
Figura 1-4: Reducción de concentraciones requerida cuando la norma anual es activa.....	10
Figura 1-5: Reducción de concentraciones ambientales de $PM_{2.5}$ asociadas a las reducciones de $PM_{10}$ en el caso de cumplimiento de la norma de $PM_{10}$ .....	10
Figura 1-6: Reducciones de concentraciones requeridas en caso con norma de $PM_{10}$ y $PM_{2.5}$ simultáneamente .....	11
Figura 1-7: Curva de Costos Totales de reducción para ciudades con información, año 2012....	15
Figura 1-8: Costo Total para Gran Concepción en el tiempo. ....	16
Figura 1-9: Exposición de la Población Chilena a $PM_{2.5}$ .....	16
Figura 1-10: Valor presente de los costos y beneficios por alternativa de norma analizada (Miles de Millones MUS\$).....	19
Figura 1-11: Funcion de Probabilidad Acumulada del Beneficio Neto para el período 2012-2041 (Millones de USD).....	21
Figura 2-1 Representación gráfica de las alternativas de norma para $PM_{2.5}$ evaluadas .....	6
Figura 2-2 Representación gráfica de los niveles máximos para la norma anual de la Alternativa 1 evaluada .....	8
Figura 3-1 Ubicación de Monitores y concentraciones de $PM_{10}$ y $PM_{2.5}$ en Chile.....	10
Figura 3-2 Promedio anual de concentraciones de material particulado por comuna .....	12
Figura 4-1: Curvas de reducción concomitante de $PM_{2.5}$ obtenidas por la norma de $PM_{10}$ . .....	21
Figura 4-2: Esquema de cálculo de reducciones de concentraciones requeridas caso base para Santiago.....	21
Figura 4-3: Esquema de cálculo de reducciones de concentraciones requeridas para el caso base para Rancagua.....	22
Figura 4-4: Esquema de cálculo de reducciones de concentraciones requeridas para el caso con norma de $PM_{2.5}$ .....	23
Figura 4-5: Curva de Costos totales de reducción de $PM_{2.5}$ para ciudades con información, año 2012.....	28
Figura 4-6: Curva de Costos totales de reducción de $PM_{10}$ para ciudades con información, año 2012.....	29
Figura 4-7: Costo Total para Gran Concepción en el tiempo .....	30
Figura 6-1: Exposición de la Población Chilena a $PM_{2.5}$ .....	37

Figura 6-2 Distribución Triangular de Costos para cada alternativa de norma analizada .....	40
Figura 6-3 Distribución Uniforme de Beneficios para cada alternativa de norma analizada .....	40
Figura 6-4 Distribución de Costos y Beneficios utilizada en el Estudio .....	41
Figura 6-5: Valor presente de los costos y beneficios (Miles de Millones MUS\$) por alternativa de norma analizada .....	43
Figura 6-6: Beneficios Netos por Alternativa Analizada y Período de 10 años (Millones de USD) .....	45
Figura 6-7: Probabilidad Acumulada vs. Beneficio Neto para período 2012-2041 (Millones de USD) .....	46
Figura 6-8 Aporte de Beneficios y Costos asociados a la norma de PM <sub>10</sub> vigente y de cada alternativa de norma de PM <sub>2,5</sub> analizada .....	47
Figura 6-9: Distribución porcentual de costos por alternativa de norma y sector a nivel Nacional .....	49
Figura 6-10: VP de los Beneficios y Costos por agente económico (Millones de USD/año) .....	51
Figura 0-1: Fracción de componentes elementales del material particulado fino 2005 .....	86
Figura 0-2: Curvas concentración-respuesta para mortalidad resultante de exposiciones de corto y largo plazo.....	92
Figura 0-3: Esquema Metodológico del análisis.....	93
Figura 0-4: Esquema del método de la función de daño.....	95
Figura 0-5: Curva de Costos para Concepción en el año 2012.....	110
Figura 0-6: Curva de Costos Totales de reducción de PM <sub>2,5</sub> para ciudades analizadas, año 2012 .....	111
Figura 0-7: Curva de Costos Totales de reducción de PM <sub>2,5</sub> DICTUC 2007 (US\$-año) .....	112
Figura 0-8: Curva de Costos Totales de reducción de PM <sub>10</sub> para ciudades analizadas, año 2012 .....	113
Figura 0-9: Costo Total para Gran Concepción en el tiempo. ....	115
Figura 0-10: Curva de Costos por Ciudad .....	116
Figura 0-11: Esquema BD para el cálculo de distribución de costos .....	119
Figura 0-12: Distribución de costos por alternativa de norma, ciudad y sector .....	122
Figura 0-13: Promedio diario PM <sub>10</sub> de las concentraciones por celdas y monitores red MACAM .....	124
Figura 0-14: Promedio diario PM <sub>2,5</sub> de las concentraciones por celdas y monitores red MACAM .....	125
Figura 0-15 Concentraciones de PM <sub>2,5</sub> por comuna para la ciudad de Santiago .....	126
Figura 0-16: Zonas para la ciudad de Santiago definidas en base a criterios socio económicos	128
Figura 0-17: Contribución a la concentración total de PM <sub>2,5</sub> por ciudad y sector, año 2012 .....	140

## Resumen Ejecutivo

La investigación y regulación acerca del material particulado y sus efectos en salud han tenido un crecimiento explosivo a nivel mundial durante los últimos 15 años como consecuencia de la gran preocupación que existe en el mundo por los niveles de contaminación atmosférica y la evidencia que existe con respecto a sus efectos en la salud de la población expuesta a ellos. El instrumento de gestión ambiental utilizado más ampliamente en el mundo corresponde a las normas primarias de calidad ambiental, que definen un nivel máximo de concentraciones ambientales, cuyo objetivo fundamental es proteger la salud de la población. Para establecer estos niveles se requiere al menos conocer como aumentan los impactos sobre la salud según aumentan las concentraciones ambientales de los contaminantes, y definir claramente qué se entiende por proteger la salud de la población. Diferentes países utilizan distintos criterios para establecer las normas primarias de calidad. Por ejemplo, en EE.UU., el Congreso mandató a través del Acta del Aire Limpio de 1970 a la Agencia de Protección Ambiental (USEPA) a establecer niveles “*que protejan la salud de la población más sensible con un adecuado margen de seguridad*”. En Chile, la Ley de Bases Generales del Medio Ambiente establece en su artículo 2º, inciso n) lo siguiente “*Norma Primaria de Calidad Ambiental: aquella que establece los valores de las concentraciones y períodos, máximos o mínimos permisibles de elementos, compuestos, sustancias, derivados químicos o biológicos, energías, radiaciones, vibraciones, ruidos o combinación de ellos, cuya presencia o carencia en el ambiente pueda constituir un riesgo para la vida o la salud de la población.*” Ambos casos pretenden proteger la salud de la población, pero con criterios expresados de diferente manera: uno con un “adecuado margen de seguridad” y el otro a través de evitar situaciones que puedan “constituir un riesgo para la vida o la salud de la población.” Ninguna de las dos provee una definición exacta<sup>1</sup>, por lo tanto, queda a criterio del regulador definir un nivel consistente con el mandato de la Ley. En el caso Chileno, en virtud de lo señalado por el Artículo 32 de la Ley 19.300, las Normas Primarias de calidad ambiental son de aplicación general en todo el territorio de la República, la que las hace sustancialmente diferentes de las Normas Secundarias de calidad ambiental y de los Planes de Prevención o Descontaminación, que tienen una aplicación geográfica limitada.

A nivel mundial, la normativa del material particulado ha evolucionado siguiendo dos grandes tendencias. La primera tiene relación con el criterio utilizado para la dictación de nuevas regulaciones o para la actualización de regulaciones existentes y la segunda tiene relación con el tamaño del material particulado normado, y con los niveles de concentraciones en que se ha fijado la norma. La evidencia científica muestra actualmente que no existe un nivel de concentraciones atmosféricas que ofrezca una protección absoluta contra los efectos perjudiciales del material particulado, tanto  $PM_{10}$  como  $PM_{2.5}$ . El paradigma de que existe una concentración bajo la cual no existen efectos nocivos para la salud (el llamado ‘umbral’) ha sido consistentemente desmentido por los resultados de los estudios científicos modernos. De este modo, al no existir un nivel seguro conocido, las normas deben tender a los niveles más bajos posibles, dadas las limitaciones, capacidades y prioridades de la salud pública locales (OMS,

---

<sup>1</sup> A primera vista pareciera que la Ley 19.300 especifica un nivel de riesgo cero, pero dicho nivel es imposible de obtener en algunos casos, por lo que la definición encierra dentro de sí un nivel de riesgo socialmente aceptable.

2005). Es así como en la actualidad Estados Unidos ha adoptado un enfoque basado en riesgo para definir y actualizar sus normas de material particulado. La reciente revisión de los Valores Guías de la Organización Mundial de la Salud y su versión anterior (OMS, 2000; OMS 2005) también están basados en niveles de riesgo. Este enfoque está fundamentado en la necesidad de definir los niveles de riesgo que la sociedad considera aceptable imponer a sus individuos (especialmente aquellos más sensibles), y está siendo adoptado por un número creciente de países.

Con respecto a los niveles de la norma y al tamaño (diámetro aerodinámico) del material particulado regulado, la tendencia internacional es hacia normas progresivamente más estrictas y al control de partículas cada vez más pequeñas. De esta manera, las normas originales que controlaban las partículas totales suspendidas (PTS) o las partículas respirables con diámetro aerodinámico menor a  $10\ \mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{10}$ ) han dado paso al control de partículas finas con diámetro aerodinámico menor a  $2.5\ \mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{2.5}$ ). Esto se basa en la creciente evidencia de que las partículas más finas tienen un impacto en la salud mayor.

En Chile existe actualmente una norma primaria de calidad ambiental para  $\text{PM}_{10}$ , por lo cual se ha iniciado un proceso de análisis y estudio de la implementación de una norma de calidad primaria que regule al  $\text{PM}_{2.5}$  en forma independiente<sup>2</sup>. Es así como el 5 de Diciembre del 2006 el Consejo Directivo de CONAMA decidió retomar el establecimiento de una norma para el  $\text{PM}_{2.5}$  incorporada en el cuarto programa priorizado de normas del 26 de Marzo de 1999. Es en este contexto que el consultor desarrolló anteriormente para CONAMA el estudio "Análisis de antecedentes para la evaluación de escenarios en la elaboración de la norma de calidad primaria de  $\text{PM}_{2.5}$ " cuyo objetivo fue la revisión de antecedentes relativos al establecimiento de un estándar de  $\text{PM}_{2.5}$  en Chile. De este análisis, se concluyó que resulta socialmente conveniente controlar específicamente la fracción fina, y se propusieron valores posibles para una norma. El presente estudio aporta antecedentes adicionales, específicamente para el análisis de los impactos económicos y sociales de una futura regulación del material particulado fino.

Es importante destacar que la Ley 19.300 de Bases del Medio Ambiente establece la necesidad de realizar un análisis técnico y económico dentro del proceso de dictación de normas. En tanto, el reglamento para la dictación de normas de calidad y emisión (D.S.N°93/95 MINSEGPRES) especifica que este análisis *"deberá evaluar los costos y beneficios para la población, ecosistemas o especies directamente afectadas o protegidas; los costos y beneficios de los emisores que deberán cumplir con la norma; y los costos y beneficios para el Estado como responsable de la fiscalización del cumplimiento de la norma"*. Si bien la normativa chilena exige un Análisis General del Impacto Económico y Social (AGIES) como parte del proceso de dictación de normas de calidad ambiental, no especifica la metodología del análisis ni el criterio que se debe usar para estimar el impacto. Cabe destacar que la ley exige evaluar costos y beneficios, pero no menciona la realización de un análisis costo beneficio y tampoco señala que los beneficios deban ser mayores que los costos para dictar la norma.

---

<sup>2</sup> Como el  $\text{PM}_{2.5}$  está incluido dentro del  $\text{PM}_{10}$ , la regulación de esta última también regula indirectamente el  $\text{PM}_{2.5}$ . Sin embargo, esta regulación es afectada por la presencia de la fracción gruesa,  $\text{PM}_{10-2.5}$ .

En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo fundamental la estimación y cuantificación de los impactos sociales y económicos que tendría la aplicación de la norma de PM<sub>2.5</sub> contenida anteproyecto de norma.

### Situación del Material Particulado en Chile

En la actualidad gran parte de Chile sufre de altas concentraciones de material particulado. Varias comunas de Chile no cumplen con la norma anual de PM<sub>10</sub>, siendo el área metropolitana de Rancagua la localidad con la mayor concentración anual de PM<sub>10</sub> durante el año 2007, superandola en un 48%. Para el caso del PM<sub>2.5</sub>, todas las áreas metropolitanas con mediciones presentan concentraciones anuales superiores al nivel propuesto por la OMS (10 µg/m<sup>3</sup>). Talca y el Gran Santiago son las áreas con mayores promedios anuales de material particulado fino, superando los valores guías en más de un 200%.

En la Figura 1-1 se presentan las concentraciones de material particulado por ciudad. Se presenta el promedio de todos los monitores de cada ciudad del año más actual disponible. Con respecto a la fracción predominante de material particulado, Chile presenta relaciones entre la fracción fina y gruesa que varían de acuerdo a la zona del País. En la zona Norte de Chile, la fracción gruesa es el componente predominante del material particulado, la razón entre la fracción fina y la fracción gruesa para esta zona presenta valores entre 0.06 y 0.36, en cambio la razón entre estas fracciones en la zona Central es cercano a 0.5. En la zona Sur, la situación es inversa a lo que ocurre en el Norte del País: la fracción fina es la que predomina en la composición del material particulado con una razón cercana a 0.7. Es importante destacar que este valor resulta mayor en períodos de invierno en que la fracción fina aumenta por el uso de leña en la región. Para la ciudad de Talca esta relación puede llegar a ser 0.9 en el percentil 98 de las concentraciones diarias. Por lo tanto la razón obtenida para la zona Sur, de acuerdo a los datos disponibles, presenta valores entre 0.52 y 0.9.

A partir de los datos obtenidos se caracterizó cada una de las zonas del país con respecto a la fracción fina y la fracción gruesa, de acuerdo al criterio presentado en la Tabla 1.1

Tabla 1-1: Relación entre la fracción fina y gruesa del PM<sub>10</sub> por Zona de Chile

Zona	Media Anual	Percentil 98	Fuente
Norte	0.18	0.18	Monitoreo Calama
Centro - Costa	0.46	0.58	Monitoreo Gran Valparaíso
Centro - Interior	0.50	0.60	Monitoreo Rancagua
Sur - Leña	0.52	0.90	Monitoreo Temuco

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de monitoreo Conama (2008)

Figura 1-1: Promedio anual de concentraciones de material particulado por área metropolitana

Región	Área Metropolitana	PM10		PM2.5		Razón
		Año	Promedio Anual (ug-m3)	Año	Promedio Anual (ug-m3)	PM2.5-PM10
XV	Arica	2008	41.3			
I	Alto Hospicio	2008	50.2	2008	18.2	0.36
	Pozo Almonte	2007	39.0			
II	Antofagasta	2007	54.9			
	Calama	2007	49.5	2007	14.5	0.29
	Mejillones	2006	39.1			
	Sierra Gorda	2005	41.3			
	Tocopilla	2006	56.0			
V	La Calera	2007	52.6			
	Cabildo	2007	20.6			
	Gran Valparaíso	2007	43.1	2007	18.7	0.42
	Putendo	2007	32.6			
	Llaillay	2007	38.5			
	Puchuncavi	2007	36.6			
	Quillota	2007	51.9			
	Catemu	2007	54.2			
	Los Andes	2007	28.1			
RM	Gran Santiago	2007	69.1	2006	31.7	0.46
VI	Gran Rancagua	2007	74.2			
	Codegua	2007	66.2			
	Requinoa	2007	56.2			
	Rengo	2007	62.8			
	San Fernando	2007	52.6			
VII	Talca	2007	49.2	2007	32.8	0.66
VIII	Gran Chillán	2007	51.7			
	Gran Concepción	2007	49.0		24.0	0.49
	Arauco	2008	43.0			
IX	Gran Temuco	2004	48.7			

**Nota:** Para el caso de Tocopilla, el valor de la concentración de PM<sub>10</sub> presentado corresponde al promedio trianual.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de monitoreo entregados por Conama (2008)

## Alternativas de Norma Evaluadas

Este estudio considera cuatro escenarios de norma anual y tres escenarios de norma diaria para Chile, con diferentes niveles de exigencia, dentro del horizonte de tiempo 2012 - 2041. La elección de estas alternativas se basa en la experiencia adquirida del estudio anterior, DICTUC (2008)<sup>3</sup> y de discusiones sostenidas con la autoridad y con los actores relevantes.

<sup>3</sup> Análisis de Antecedentes para Evaluación de Escenarios en la Elaboración de la Norma de Calidad Primaria de PM<sub>2.5</sub>. DICTUC, División Medio Ambiente, 2008.

Históricamente, las normas de calidad en Chile han sido fijadas con un nivel único, sin una introducción gradual. El plazo de cumplimiento de la norma, en el caso de las localidades que al momento de dictación de la norma no cumplen con ella, ha sido definido en el Plan de Descontaminación respectivo<sup>4</sup>. La única experiencia de una norma que contempla una variación en el tiempo es la norma de PM<sub>10</sub>, que considera una reducción en su valor diario en el año 2012 si es que para ese año no se ha dictado una norma de PM<sub>2.5</sub>.

Las alternativas analizadas en este estudio reconocen el criterio de gradualidad en la implementación de la norma para PM<sub>2.5</sub>, el cual considera que el cumplimiento de la norma es, en general, un proceso que toma una cantidad de tiempo importante, ya que incluye varios procesos: la declaración de zona saturada, la formulación y dictación del respectivo Plan de Descontaminación, y luego la aplicación y cumplimiento de las medidas contenidas en el Plan. Este enfoque posee la ventaja de que provee certeza jurídica a la autoridad y los emisores con respecto a los niveles de la norma en el futuro y hace más difícil la apropiación de la capacidad de carga de una cuenca atmosférica con respecto a la norma actual, dando un instrumento a la autoridad para exigir en forma anticipada de la aplicación formal de la norma compensaciones o limitaciones a las emisiones.

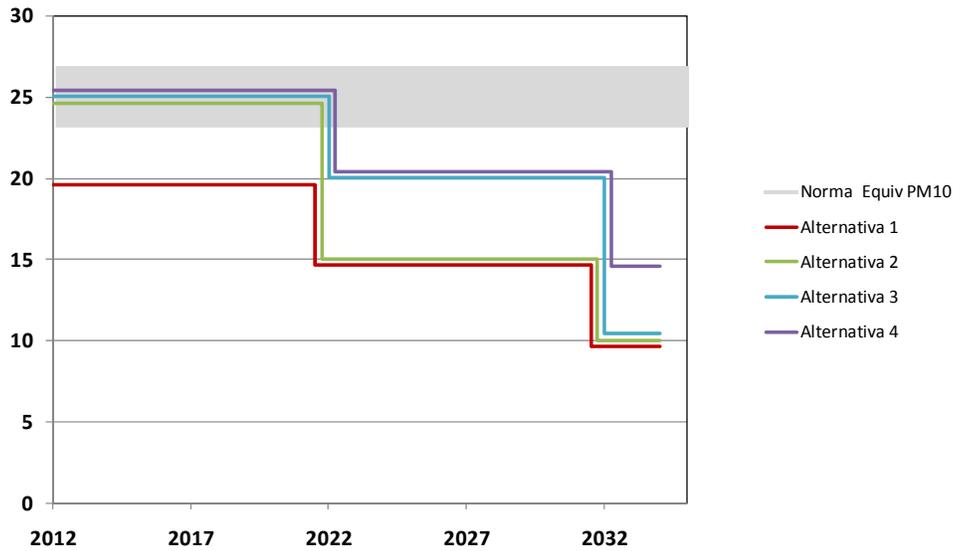
Las alternativas de norma anual para el material particulado fino (PM<sub>2.5</sub>) analizadas en el estudio se presentan en la tabla Tabla 1-2 y Figura 1-2. La alternativa más laxa considera un nivel anual de 25 µg/m<sup>3</sup>, que es equivalente, en términos generales a la norma actual de PM<sub>10</sub>, considerando que el promedio anual de PM<sub>2.5</sub> es la mitad que el promedio anual de PM<sub>10</sub>. La alternativa más estricta considera el cumplimiento de la recomendación de la OMS en el año 2032, es decir, 20 años después de introducida la norma.

Tabla 1-2: Alternativas de norma anual para PM<sub>2.5</sub> (promedio tri-anual, µg/m<sup>3</sup>)

Año Vigencia	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
2012	20	25	25	25
2022	15	15	20	20
2032	10	10	10	15

<sup>4</sup> No nos referimos aquí al caso de latencia o de aumento gradual de concentraciones que llevan a la latencia, ya que es similar.

Figura 1-2: Alternativas de norma anual para PM<sub>2.5</sub> (promedio tri-anual, µg/m<sup>3</sup>)



Fuente: Elaboración propia.

Para cada una de las alternativas se analizó la conveniencia social desde dos perspectivas: riesgos individuales y costos y beneficios sociales.

Se analizaron tres alternativas de norma diaria para PM<sub>2.5</sub> considerando distintas razones entre la norma diaria (percentil 98) y la norma anual. A continuación se presentan los niveles de norma diaria consideradas en el estudio.

Tabla 1-3: Alternativas de norma diaria evaluadas

Norma Anual PM <sub>2.5</sub>	Norma Diaria PM <sub>2.5</sub>		
	2x	2.5x	3x
25	50	63	75
20	40	50	60
15	30	38	45
10	20	25	30

Fuente: Elaboración propia

La norma diaria queda definida entonces de acuerdo a la razón existente entre la norma anual de PM<sub>2.5</sub> y el percentil 98 de la norma, que corresponde a la norma diaria de la norma. La segunda alternativa analizada (2.5 veces la norma anual) corresponde a los valores guías de la OMS.

## Análisis de Riesgos Individuales

El criterio basado en riesgos individuales se basa en la limitación de los riesgos que la sociedad considera aceptable imponer a sus miembros. En base a estimaciones de tasas de mortalidad por ciudad obtenidas de INE (2005) y los resultados de riesgo relativo reportados por (Pope and Dockery 2006) se estimó las muertes evitadas y el aumento en la esperanza de vida (EV) por cada 5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  de  $\text{PM}_{2.5}$  reducidos. (los cálculos de aumento en esperanza de vida son consistentes con los resultados presentados recientemente por Pope et al 2009)

En la siguiente tabla se presenta el riesgo individual de cuatro de las ciudades en estudio, para adultos mayores de 65 años. El riesgo adicional se calcula con respecto a la concentración de  $\text{PM}_{2.5}$  recomendada por la OMS, 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  de promedio anual. Si en Santiago se alcanzara dicha concentración se evitarían 2800 muertes al año en este grupo de edad.

Tabla 1-4: Aumento de riesgo de mortalidad prematura por causas cardiopulmonares en adultos mayores de 65 años para cuatro ciudades en estudio.

Grupo Etareo	65+ años	Concepcion	Santiago	Temuco	Tocopilla
		<i>Tasa Mortalidad (casos por 100.000h/año)</i>			
		1,607	1,831	1,879	2,395
Concentracion	% Aumento Mortalidad	<i>Riesgo en Exceso (per 1 millon)</i>			
10	0.0%	0	0	0	0
15	0.6%	97	111	114	145
20	1.2%	194	222	227	290
25	1.8%	292	332	341	435
30	2.4%	389	443	455	580
35	3.0%	486	554	569	724

Fuente: Elaboración propia en base a datos INE (2005) y Pope y Dockery (2006)

La reducción en la esperanza de vida de hombres y mujeres debido a diferentes escenarios de reducción en la concentración de  $\text{PM}_{2.5}$ , de acuerdo a diferentes estudios se presenta a continuación.

Tabla 1-5: Aumento de Esperanza de Vida (meses) para hombres y mujeres por reducción de PM<sub>2.5</sub>

Estudio	Delta RR	Reducción PM 2.5 (ug/m3)	Aumento Esperanza vida Hombres (meses)	Aumento Esperanza vida Mujeres (meses)
ACS - Education Adjusted Base	0.01	1	1.1	1.2
Base	0.007		0.7	0.8
Harvard 6 Cities	0.016		1.8	1.9
ACS - Education Adjusted Base	0.05	5	5.5	6.1
Base	0.033		3.5	4
Harvard 6 Cities	0.08		8.9	9.7
ACS - Education Adjusted Base	0.1	10	11.2	12.2
Base	0.066		7.3	8
Harvard 6 Cities	0.16		17.8	19.2
ACS - Education Adjusted Base	0.15	15	16.7	18
Base	0.099		11.1	12
Harvard 6 Cities	0.24		26.4	28.2

Fuente: Elaboración propia en base a datos INE (2005) y Pope and Dockery 2006.

### Análisis de los Costos y Beneficios Sociales de la aplicación de la norma

Para determinar los costos y beneficios sociales de la aplicación de la norma, se siguieron las siguientes etapas:

1. Determinación de que norma, de entre todas las vigentes, está activa para la ciudad y periodo bajo análisis, y de la reducción de concentraciones requeridas para cumplir con la norma.
2. Estimación de los beneficios sociales debido a la reducción de concentraciones de material particulado producida por el cumplimiento de la norma activa
3. Estimación de costos de abatimiento de emisiones para lograr la reducción de concentraciones requerida.
4. Estimación de los beneficios netos del cumplimiento de la norma.

El objetivo principal de este estudio es analizar los impactos económicos y sociales de la implementación de una norma de PM<sub>2.5</sub>, pero un objetivo adicional es determinar la conveniencia de aplicar la norma de PM<sub>2.5</sub> adicionalmente a la actual norma de PM<sub>10</sub>. Para esto, se deben calcular el beneficio social neto de cada norma, y luego compararlos. Esto requiere analizar dos casos:

1. **El caso base**, en que se mantiene la norma anual de PM<sub>10</sub> de 50 µg/m<sup>3</sup> y se reduce la norma diaria de PM<sub>10</sub> de 150 a 120 µg/m<sup>3</sup>.
2. **El caso con proyecto**, en que se mantienen los niveles anuales y diarios de la norma de PM<sub>10</sub> en 50 y 150 ug/m<sup>3</sup> respectivamente, y se agrega la norma de PM<sub>2.5</sub>

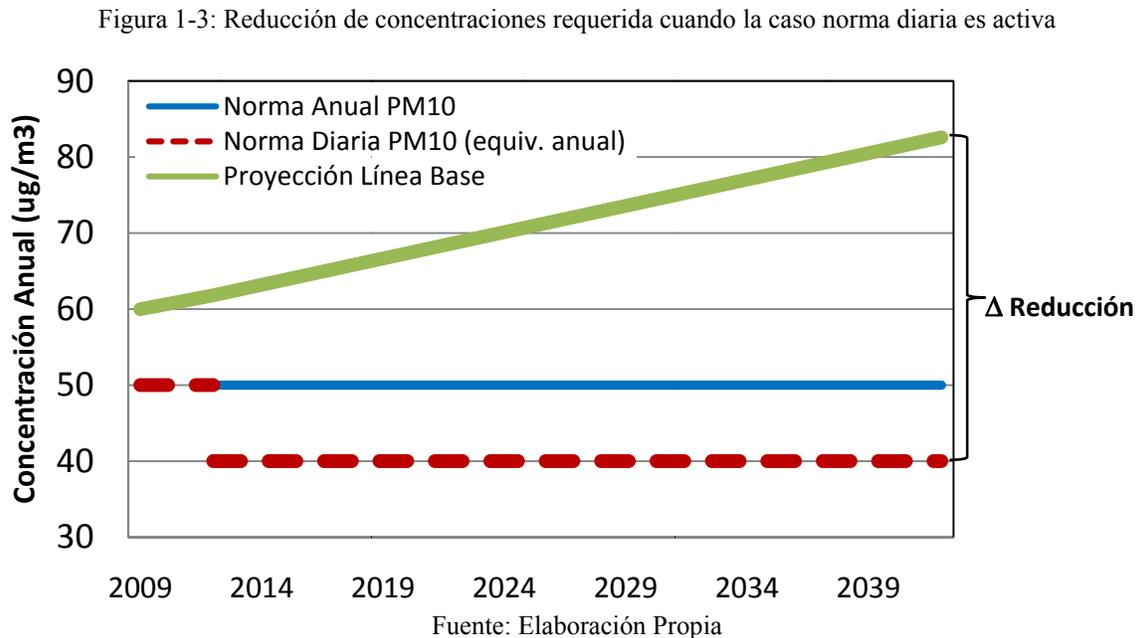
El análisis de cada caso se llevo a cabo siguiendo las etapas señaladas mas arriba, considerando las particularidades de cada caso. La comparación de los beneficios sociales netos de cada caso nos permitirá evaluar la conveniencia social de la aplicación de la norma de PM<sub>2.5</sub>.

**Etapa 1: Determinación de la norma activa y de la reducción de concentraciones requerida**

**Caso Base: Norma de PM10**

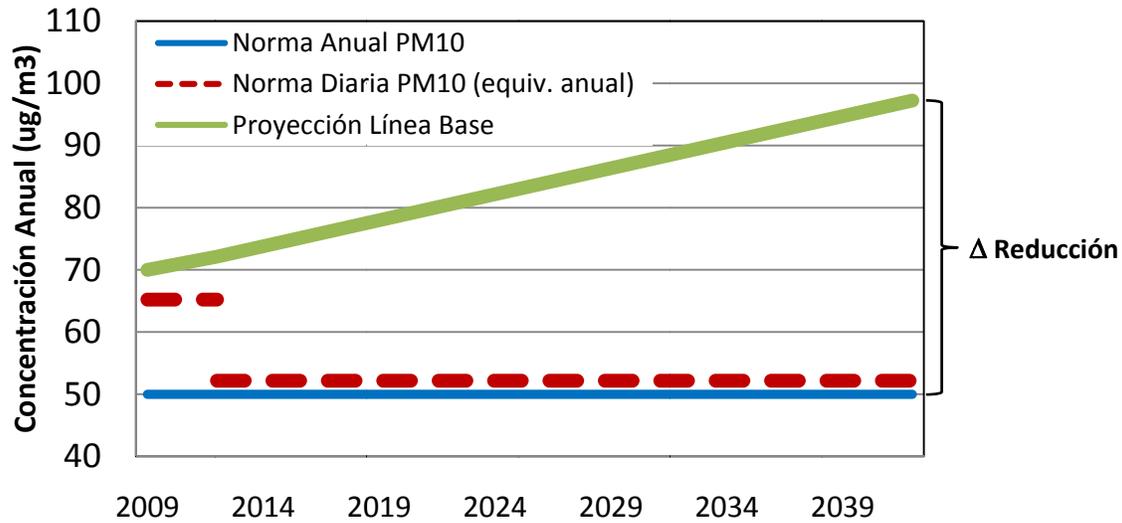
Para la correcta estimación de las reducciones de concentraciones de PM<sub>10</sub> se definió cual de las normas (anual o diaria) se encontraba activa en cada una de las ciudades consideradas en el análisis. (Debido a la relación existente entre la media anual y el percentil 98 de las concentraciones diarias puede que la norma diaria resulte mas estricta que la norma anual, y viceversa.).

A continuación se presenta el esquema utilizado en el análisis para el cálculo de reducciones de concentraciones requeridas, para el caso en que la norma diaria sea más estricta que la norma anual vigente. En este caso, como muestra la figura, la reducción anual requerida esta dada por el equivalente anual de la norma diaria.



En el caso en que la norma anual es más estricta que la norma diaria (en su equivalente anual), la reducción de concentraciones requerida para cumplir con la norma corresponde al presentado en la siguiente figura.

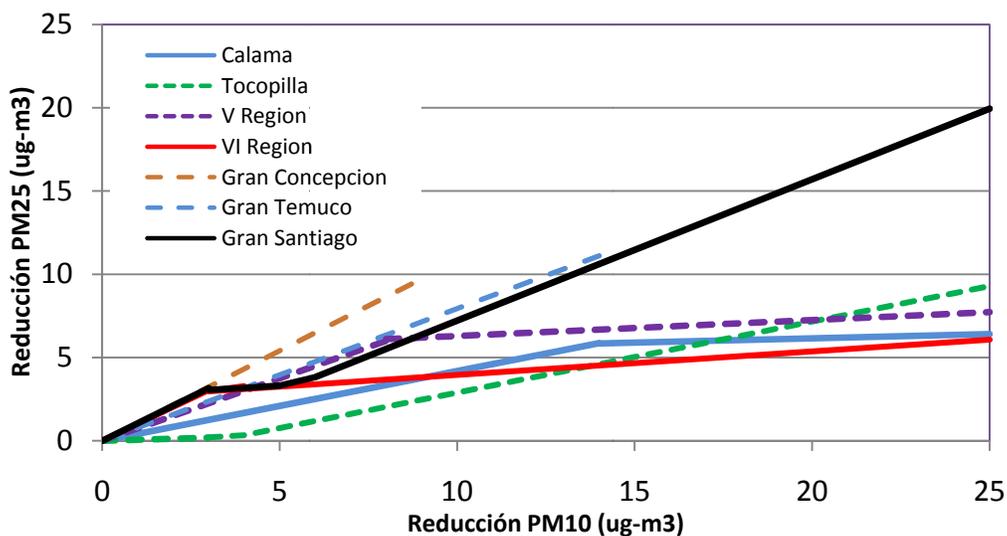
Figura 1-4: Reducción de concentraciones requerida cuando la norma anual es activa



Fuente: Elaboración Propia

Analizando estos dos casos, se obtienen las reducciones de concentraciones de  $PM_{10}$  requeridas en cada ciudad. Sin embargo, como se verá en la sección de estimación de beneficios, los mayores efectos (de largo plazo, y mortalidad) están asociados a  $PM_{2.5}$  y no a  $PM_{10}$ , por lo que es necesario estimar la reducción de  $PM_{2.5}$  asociada al cumplimiento de la norma de  $PM_{10}$ . Cumplir con la norma de  $PM_{10}$  requiere la reducción de emisiones de diferentes precursores, en una proporción determinada por el menor costo total de reducción de emisiones. Esta reducción de emisiones produce también reducciones en las concentraciones de  $PM_{2.5}$ . La siguiente figura presenta la relación entre las reducciones de  $PM_{2.5}$  y las reducciones de  $PM_{10}$ . La relación no es monotonica ya que las combinaciones de reducción de precursores que minimizan los costos de reducción para lograr una cierta reducción de  $PM_{10}$  no necesariamente producen una reducción constante de  $PM_{2.5}$ .

Figura 1-5: Reducción de concentraciones ambientales de  $PM_{2.5}$  asociadas a las reducciones de  $PM_{10}$  en el caso de cumplimiento de la norma de  $PM_{10}$ .

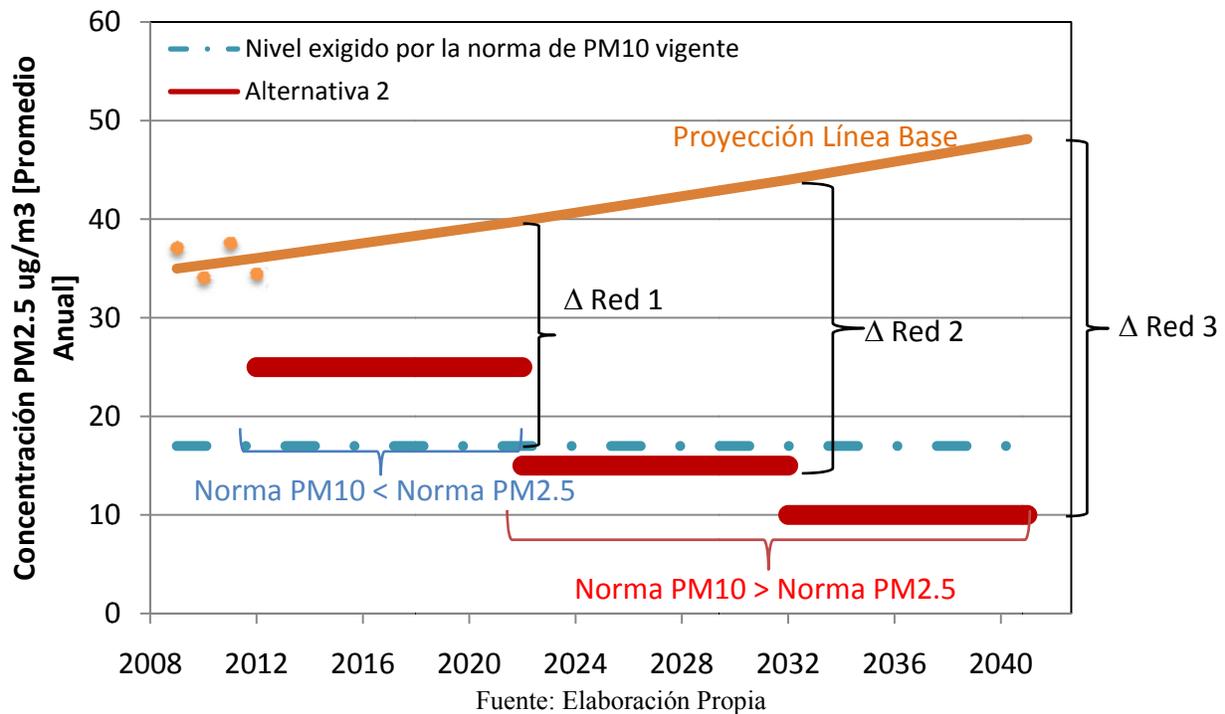


Fuente: Elaboración propia

### Caso con Proyecto: Norma de PM<sub>2.5</sub>

En este caso, tanto la norma de PM<sub>10</sub> como la de PM<sub>2.5</sub> están vigentes en forma simultánea. En forma similar a lo realizado para la norma anual/diaria, en este caso se estudia cuál norma está activa. Para esto, se calcula la reducción de PM<sub>2.5</sub> asociada a la norma de PM<sub>10</sub> usando la relación obtenida según el itinerario de reducciones de emisiones a mínimo costo de PM<sub>10</sub>. Si con esto se cumple la norma de PM<sub>2.5</sub>, entonces esta norma es inactiva. Por el contrario, si después de cumplir la norma de PM<sub>10</sub> aun no se cumple la norma de PM<sub>2.5</sub>, esta última será la norma activa. Esto ocurrirá principalmente en los últimos periodos, ya que la norma de PM<sub>2.5</sub> es decreciente en el tiempo. En la figura Figura 1-6 se muestra de manera gráfica el esquema utilizado para el caso de la alternativa de norma propuesta.

Figura 1-6: Reducciones de concentraciones requeridas en caso con norma de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> simultáneamente



En el caso presentado en la figura (que corresponde solo a un ejemplo) se muestra que en el primer periodo, la norma de PM<sub>10</sub> es activa (por lo tanto la norma de PM<sub>2.5</sub> no tiene ningún efecto), mientras que en los periodos 2 y 3 la norma de PM<sub>2.5</sub> es activa. Este ejemplo es solo ilustrativo.

#### ***Etapa 2: Estimación del Beneficio Social de la Reducción de Concentraciones***

Para la evaluación de beneficios se estimó la reducción en exposición de la población para diferentes efectos en base a estudios chilenos e internacionales, y a las características de la población expuesta (tasas base de efectos). Esto posteriormente se cuantifica utilizando valores sociales para cada efecto. Dentro de estos valores el más importante es la disposición a pagar por la reducción en riesgo de muerte.

La evidencia de estudios internacionales y nacionales muestra que el efecto en la salud de las partículas finas (PM<sub>2.5</sub>) es mucho mayor que el de la fracción gruesa del material particulado (PM<sub>10-2.5</sub>), especialmente en el caso de efectos crónicos, que constituyen la mayor fracción de los beneficios.

Los efectos a la salud considerados en este estudio y las reducciones de casos utilizando un intervalo de confianza de 90% se resumen en la tabla siguiente.

Tabla 1-6: Reducción de casos en exceso por cada millón de personas por µg/m<sup>3</sup> de PM<sub>2.5</sub>, promedio nacional.

Efecto	Causa	Grupo Edad	Casos en Excesos (Casos/Millones personas por µg/m <sup>3</sup> )
Mortalidad Prematura	Todas las causas, exposición de largo plazo	Todos	(7 – 40)
	Causas Cardiopulmonares, exposición de largo plazo	30+	(8 – 27)
Admisiones Hospitalarias	Enfermedades Respiratorias Crónicas	Todos	(20 – 68)
	Enfermedades Cardiovasculares	Todos	(22 – 54)
	Enfermedades Respiratorias	<65	(29 – 85)
Visitas Médicas	Niños con Infección Respiratoria Aguda (IRA) baja	3 a 15	(138 – 1,100)
Otros	Días laborales perdidos	Adultos	(14,600 -19,000)
	Días con Actividad Restringida	Adultos	(25,000 –31,000)
	Días con Actividad Restringida Menor	Adultos	(42,000 –58,000)

Fuente: Elaboración propia a partir de tasas base nacionales, y funciones concentración-respuesta referidas en el Anexo.

El beneficio social de la norma corresponde a las reducciones en concentraciones de PM<sub>2.5</sub> producidas por la implementación de la nueva norma en Chile. Los beneficios sociales de las reducciones en concentración de PM<sub>2.5</sub> requeridas por las alternativas de norma fueron estimadas multiplicando los beneficios unitarios por µg/m<sup>3</sup> de PM<sub>2.5</sub> reducido, actualizados por DICTUC (2008) en base a los resultados de Cifuentes et al. (2005), por las reducciones requeridas.

Con respecto a los beneficios unitarios, se analizaron dos escenarios de valoración: Alto y Bajo. El escenario bajo considera mortalidad cardiopulmonar y un valor conservador de la disposición a pagar por reducciones de riesgo de muerte. En cambio, el escenario alto considera mortalidad por todas las causas, y un valor medio de la disposición a pagar por reducciones de riesgo de muerte. Los valores marginales para cada uno de los escenarios, en dólares por µg/m<sup>3</sup> de PM<sub>2.5</sub> de promedio anual reducidos y su correspondiente intervalo de confianza (90%), se presentan en la Tabla 1-7.

Tabla 1-7: Beneficios Unitarios por persona por cada  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  reducido de  $\text{PM}_{2.5}$ . Promedio Nacional (dólares de 2007)

Año	Escenario Bajo		Escenario Alto	
	mid	IC 90%	mid	IC 90%
2008	<b>7.0</b>	(5 -9)	<b>33</b>	(23 -43)
2012	<b>7.6</b>	(5 -10)	<b>36</b>	(25 -46)
2022	<b>9.2</b>	(6 -12)	<b>44</b>	(30 -57)
2032	<b>11</b>	(8 -15)	<b>53</b>	(37 -69)

Fuente: Elaboración Propia

Por otra parte, la implementación de una normativa para el material particulado fino tendría otros beneficios que no han sido cuantificados ni valorizados y que por lo tanto no fueron incluidos en el beneficio total de la norma. En la siguiente tabla se resumen los beneficios no considerados en el estudio.

Tabla 1-8 Beneficios no Cuantificados ni valorizados en el Estudio

Beneficio	Receptor Impactado	Descripción	Observaciones
Visibilidad	Paisaje	Aumento en la visibilidad, lo que además conlleva a beneficios estéticos asociados a un aumento del valor escénico de los entornos naturales y artificiales del País, una disminución en el riesgo de contraer accidentes automovilísticos y un estímulo al turismo, entre otros beneficios.	Beneficio sólo incluido para la ciudad de Santiago
Materiales	Construcciones	Alteración de los materiales de construcción y recubrimientos evitada en edificaciones expuestas a la contaminación (corrosión en superficies metálicas, suciedad sobre las fachadas por la sedimentación de las partículas )	Beneficio sólo incluido para la ciudad de Santiago
Agricultura	Cultivos	Aumento de la productividad en la agricultura por disminución de $\text{SO}_2$ , precursor de $\text{PM}_{2.5}$	
Biodiversidad	Flora y Fauna	Protección Biodiversidad	
	Ecosistemas	Protección de Ecosistemas por disminución de deposición seca y/o húmeda	
	Suelo y Cuerpos de Agua	Protección de los suelos y aguas superficiales de la acidificación y eutrofización.	

Fuente: AGIES PPDA 2008, WBG. (1998) Pollution Prevention and Abatement Handbook 1998: toward cleaner, Laurenzi Tabasso M. y Marabelli M. (1992)

### Etapa 3: Estimación de Costos

La estimación de costos se realizó a nivel de fuentes detalladas en inventarios de emisiones, utilizando como información para las medidas de reducción de emisiones: los AGIES<sup>5</sup> de planes de descontaminación de la Región Metropolitana, Temuco, Tocopilla y Calama (que cuenta con 17 medidas para fuentes móviles, 10 medidas para fuentes fijas y 2 medidas para fuentes fugitivas) y la información del *Air Control Net Documentation Report* (costo-efectividad para PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, NO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub>, SO<sub>x</sub>) desarrollado para US-EPA para el análisis de regulación en calidad del aire en Mayo 2006, considerando aquellas medidas que eran aplicables a la realidad chilena. (53 medidas para Fuentes fijas).

De esta manera, en las ciudades con inventarios de emisiones disponibles, se utilizaron las medidas contenidas en los AGIES locales complementadas con medidas EPA, para obtener la curva de costos. En las ciudades sin inventarios de emisiones disponibles, se realizó una asignación directa de curvas de costos de otras ciudades con características similares. En la Tabla 1-9 se resume los inventarios de emisiones utilizados para este estudio.

Tabla 1-9: Inventarios ocupados en el estudio.

Zona	Tipos de Fuente	Fuente	Año Inventario
Tocopilla	FF, FM, FFug	DICTUC 2006	2005
Calama	FF, FM, FFug	DICTUC 2008	2006
Ventanas	FF, FM, FFug	DICTUC 2008	2006
V Región	FF, FM	CENMA 2001	2000
VI Región	FF, FM	DICTUC (2007), SECTRA_PACIN III (2006)	2010
Gran Concepción	FF, FM	DICTUC (2007), SECTRA PACIN III (2006)	2005, 2000
Gran Temuco	FF, FM, FFug	DICTUC (2008)	2010
Gran Santiago	FF, FM, FFug	DICTUC (2007)	2005

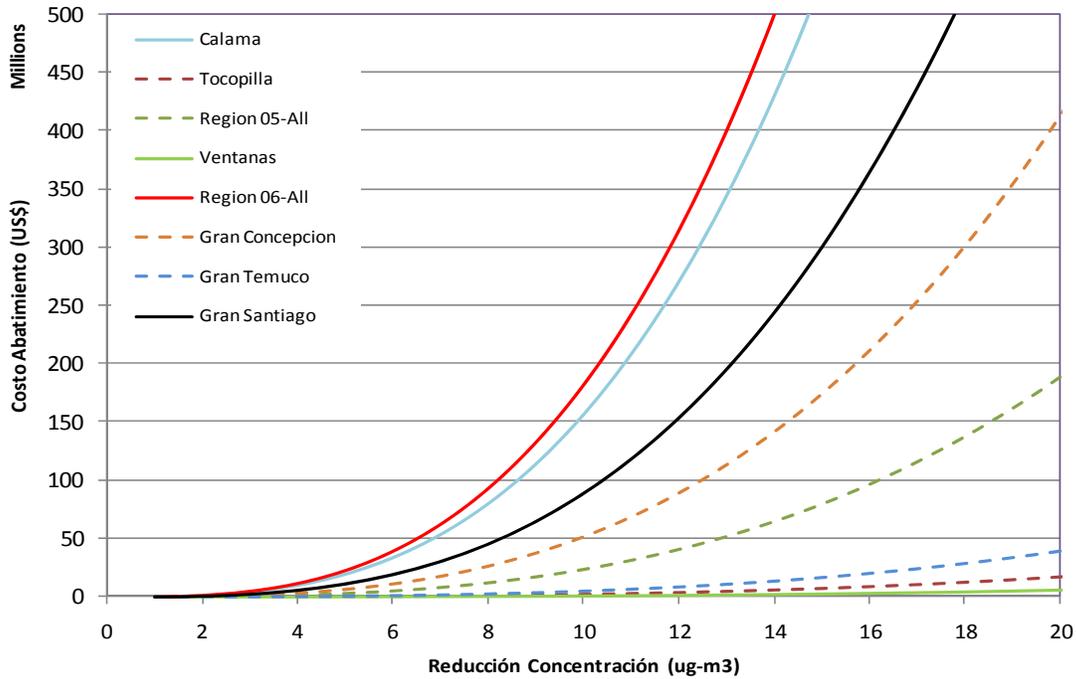
FF: Fuentes Fijas, FM: Fuentes Móviles, FFug: Fuentes Fugitivas  
Fuente: Elaboración propia.

Para estimar la concentración de PM<sub>2.5</sub> a partir de las medidas de reducción de emisiones, se utilizaron factores de emisión concentración (FEC), que relacionan la reducción en emisiones con la reducción de concentraciones ambientales.

<sup>5</sup> AGIES entregados por Conama al consultor

Los costos de reducción para alcanzar la nueva norma se estimaron usando curvas de costo total por  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  de  $\text{PM}_{2.5}$  reducido, integrando las curvas de costos medios obtenidas a partir de las medidas asignadas por fuente para las ciudades con inventario de emisiones disponibles. Esta curva, graficada en la Figura 1-7, entrega los costos totales mínimos para cada nivel de reducción. La metodología empleada para estos resultados se presenta en detalle en el Anexo IX.

Figura 1-7: Curva de Costos Totales de reducción para ciudades con información, año 2012



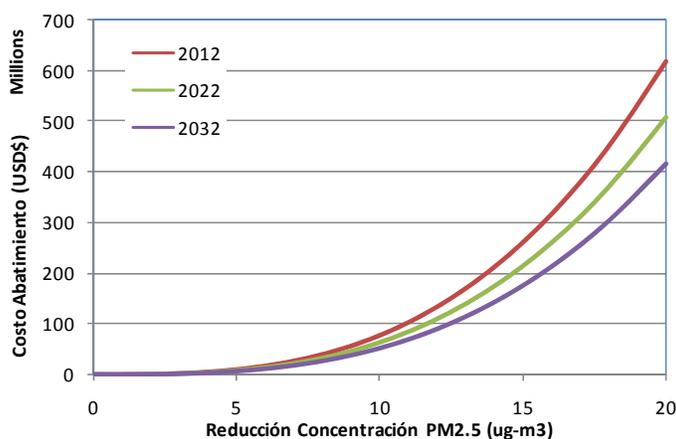
Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, los costos de reducción van decayendo en el tiempo. Para este estudio se consideró que los costos disminuirán en el tiempo debido a: (Rubin et al. 2004).

- Mejoras tecnológicas. Se asume que se produce una disminución de los costos a un ritmo anual del 1%.
- Mejoras en efectividad. Se asume que la eficacia de reducción de las concentraciones de  $\text{PM}_{2.5}$  en un 1% anual.

La Figura 1-8 muestra esta variación para el Gran Concepción.

Figura 1-8: Costo Total para Gran Concepción en el tiempo.

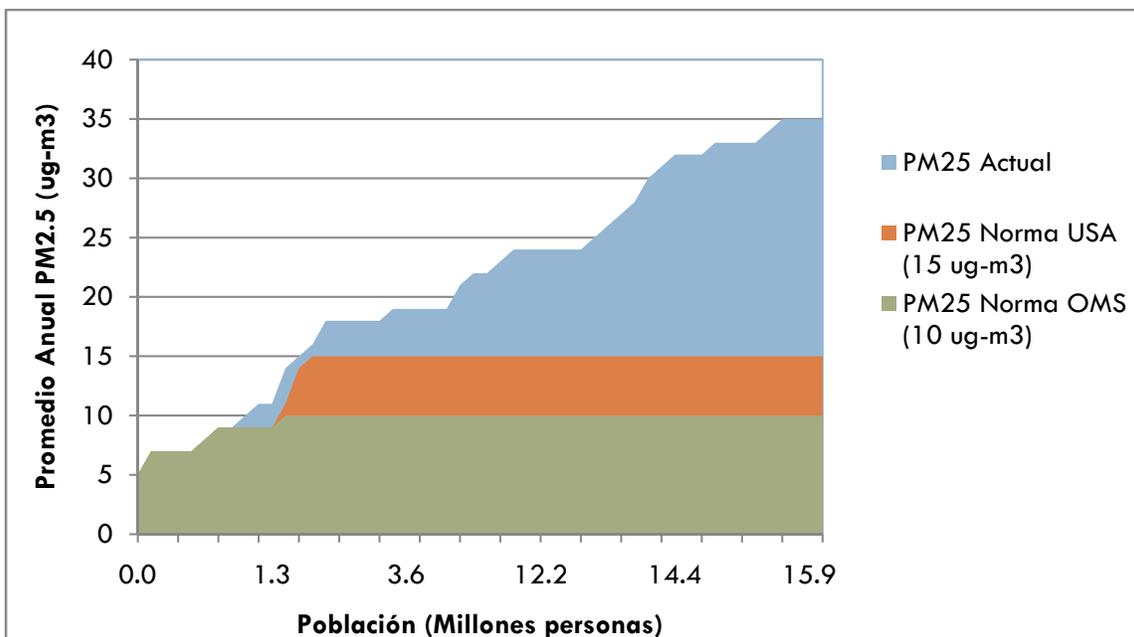


Fuente: Elaboración propia.

## Resultados

Más de 10 millones de habitantes están expuestos a concentraciones mayores a 15 (ug/m3) de PM<sub>2.5</sub> en Chile, valor que corresponde a la norma anual vigente en EE.UU. Si se compara la población expuesta a niveles superiores al recomendado por la OMS de 10 (ug-m3), la situación se torna aún más crítica, como se puede apreciar en la figura a continuación.

Figura 1-9: Exposición de la Población Chilena a PM2.5



Fuente: Elaboración Propia a partir de datos de monitoreo entregados por Conama (2008). NOTA: Eje X no en escala.

De acuerdo a la figura presentada anteriormente se puede apreciar que gran parte de la población se encuentra expuesta a niveles considerados peligrosos para la salud, lo que se traduce en muertes y enfermedades adicionales.

Se estimó el número de casos evitados, para los distintos efectos a la salud considerados en el análisis (Tabla 4-4) para cada alternativa de norma propuesta considerando el período comprendido entre 2012-2041. En la Tabla 1-10 se presentan los resultados obtenidos, incluyendo además el costo de implementación de cada una de las alternativas de norma propuestas (percentil 50). Como se aprecia en la tabla, la Alternativa 1 evitaría el mayor número de muertes pero a un mayor costo.

Tabla 1-10: Casos Totales Evitados en el Período 2012-2041 (Miles de casos) y costos por alternativa de norma (Millones de USD)

Efecto	Norma Base PM10	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
Mortalidad Prematura (valor alto)	122x10 <sup>3</sup>	161	157	148	128
Admisiones Hospitalarias	197	268	260	244	209
Visitas Sala Emergencia Niños	821	1,070	1,040	992	858
Días Laborales Perdidos	49,200	63,800	62,400	59,400	51,400
Días con alguna restricción de actividad	234,000	304,000	297,000	283,000	245,000
<b>Valor Presente Costos (M USD)</b>	<b>11,300</b>	<b>23,600</b>	<b>20,000</b>	<b>15,600</b>	<b>11,200</b>

Nota: Los casos para la Norma Base PM<sub>10</sub> se calculan con respecto a la situación proyectada. Las alternativas de Norma de PM<sub>2,5</sub> son adicionales a la Norma Base PM<sub>10</sub>, es decir, los casos totales evitados para cada alternativa corresponden a la suma de la norma base y cada alternativa.

\*Valores presentados con dos cifras significativas

Fuente: Elaboración Propia

Adicionalmente a los casos evitados, la implementación de las distintas alternativas de norma implicarían un aumento en la esperanza de vida de toda la población como consecuencia de la reducción de de concentraciones de PM<sub>2,5</sub>, situación que es posible ver en la Tabla 1-11.

Tabla 1-11: Aumento Promedio de Esperanza de Vida considerando un promedio de vida de 80 años (meses)

Norma	2012	2022	2032
Base PM10	7.4	7.4	7.4
Alternativa 1	11.0	11.8	12.3
Alternativa 2	10.7	11.8	12.3
Alternativa 3	10.3	11.5	12.3
Alternativa 4	7.8	8.5	8.9

Fuente: Elaboración Propia

Se estimaron los costos y beneficios para cada una de las alternativas propuestas. En la Tabla 1-12 es posible apreciar el percentil 50<sup>6</sup> de la distribución de probabilidad acumulada del valor presente de beneficios y costos, segmentados por períodos de 10 años y para todo el período de evaluación analizado.

Tabla 1-12: Valor presente de los costos y beneficios por período(percentil 50, Millones de US\$)

Alternativa Norma	Indicador	2012 - 2021	2022 - 2031	2032 - 2041	2012 - 2041
<b>Base</b>	VP Beneficios	21,000	14,400	9,900	<b>45,200</b>
	VP Costos	7,400	2,800	1,100	<b>11,300</b>
<b>Alternativa 1</b>	VP Beneficios	21,100	17,400	16,500	<b>54,900</b>
	VP Costos	8,700	7,700	7,300	<b>23,600</b>
<b>Alternativa 2</b>	VP Beneficios	18,800	17,400	16,500	<b>52,600</b>
	VP Costos	5,100	7,700	7,300	<b>20,000</b>
<b>Alternativa 3</b>	VP Beneficios	18,800	14,400	16,500	<b>49,700</b>
	VP Costos	5,100	3,300	7,300	<b>15,600</b>
<b>Alternativa 4</b>	VP Beneficios	18,800	14,400	11,900	<b>45,100</b>
	VP Costos	5,100	3,300	2,900	<b>11,200</b>

Nota: Valor Presente calculado para los distintos períodos, con una tasa de descuento de 8% anual. Tipo Cambio 640 CLP/USD. Valores presentados con dos cifras significativas.

Fuente: Elaboración propia.

Los beneficios obtenidos fluctúan entre [45,000 – 55,000] siendo siempre mayores a los costos para todas las alternativas evaluadas, considerando el percentil 50 de los resultados obtenidos. Las alternativas 1, 2 y 3 presentan beneficios mayores a los beneficios asociados a la situación base. Sólo la alternativa 4 presenta beneficios del orden de magnitud de la alternativa base, incluso un poco menores en el primer periodo.<sup>7</sup>

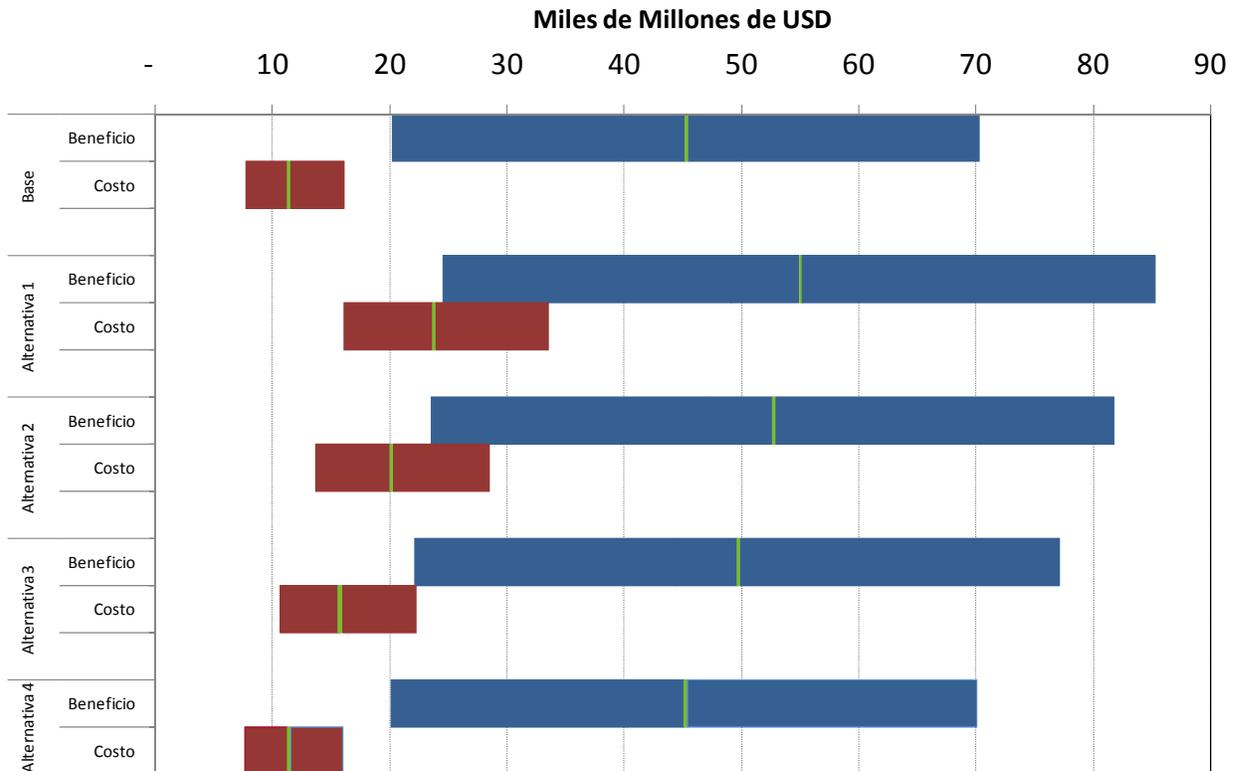
Los costos de la implementación de la norma fluctúan entre [11,000 – 24,000] miles de millones de USD durante los 30 años en los que se evalúa el proyecto. Nuevamente, la alternativa 4 presenta costos menores que los costos que se deben incurrir para cumplir con el nivel exigido por la norma de PM<sub>10</sub> (120 ug/m<sup>3</sup> diario) en el caso que no entrara en vigencia una norma para el material particulado fino (situación base). La alternativa 1 es la que presenta mayores costos de implementación (2.1 veces los costos de la situación base). A su vez las alternativas 2 y 3 presentan costos 1.8 y 1.4 veces superiores a los costos de la situación base respectivamente.

<sup>6</sup> El percentil 50 representa el valor bajo el cual se encuentran la mitad de los datos de la muestra, y en este caso representa la mediana del intervalo de confianza estimado.

<sup>7</sup> Los beneficios de la alternativa 4 son menores por que en el caso base (solo norma de PM10) el valor de la norma diaria baja a 120 ug/m<sup>3</sup>, mientras que en el caso con norma de PM2.5, este se mantiene en 150 ug/m<sup>3</sup>, y en este caso, la norma de PM2.5 no esta activa, por lo que las reducciones requeridas son menores que en el caso base.

Los resultados anteriores están basados en el percentil 50 de la distribución de probabilidad estimada para los resultados. En la decisión se debe considerar adicionalmente el rango en que fluctúan los costos y beneficios de cada una de las alternativas propuestas. En la Figura 1-10 se muestra el percentil 50 y el intervalo de confianza del 80% (percentiles 10 y 90%) estimado para el valor presente total de costos y beneficios de cada alternativa analizada.

Figura 1-10: Valor presente de los costos y beneficios por alternativa de norma analizada (Miles de Millones MUS\$)



Nota: Percentil 50 indicado con línea amarilla. El rango corresponde al percentil 10% y 90%.

Fuente: Elaboración Propia

Por otra parte la implementación de la norma implicaría, en el caso de la alternativa 1 incurrir en un mayor costo los primeros diez años de implementación debido al nivel exigido para el primer período, disminuyendo en los períodos siguientes. Con respecto a las alternativas 2 y 3, a pesar de que llegan al mismo nivel de norma, la exigencia comienza antes en el caso de la alternativa 2, lo que se traduce en que hay que incurrir en un mayor costo en el segundo período (\$1.100 MUS\$ versus \$500 MUS\$). En la Tabla 1-13 se presentan los costos de reducción anuales para cada período y para cada alternativa de norma analizada.

Tabla 1-13: Costo de Reducción Anual por Periodo de tiempo (Millones de USD por año)

Alternativa Norma	2012-2021	2022-2031	2032-2041
<b>Base</b>	1 100	400	200
<b>1</b>	1 300	1 100	1 100
<b>2</b>	800	1 100	1 100
<b>3</b>	800	500	1 100
<b>4</b>	800	500	400

Fuente: Elaboración Propia

Todas las alternativas analizadas presentan un beneficio neto en órdenes de magnitud similares para el percentil 50 y percentil 90 de los resultados. En el límite superior del intervalo de confianza considerado (percentil 90), la alternativa 1 (alternativa más estricta en los niveles exigidos alcanzando al final del período el nivel recomendado por la OMS,  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y la alternativa 2 son las que presenta el mayor beneficio social neto (61 700 MUSD). Sin embargo, la alternativa 1 tiene el menor beneficio neto en el límite inferior del intervalo de confianza (percentil 10), siendo de esta manera la alternativa que presenta los escenarios con mayores beneficios posibles pero a la vez la mayor incertidumbre en los resultados finales.

Las alternativas 3 y 4 son las que presentan los mayores beneficios netos para el percentil 50 de los resultados. Pero para el percentil 90, la alternativa 3 es la que presenta beneficios sociales mayores en comparación a la alternativa 4.

Tabla 1-14 Beneficio Neto para las distintas alternativas de norma analizadas (Millones de US\$)

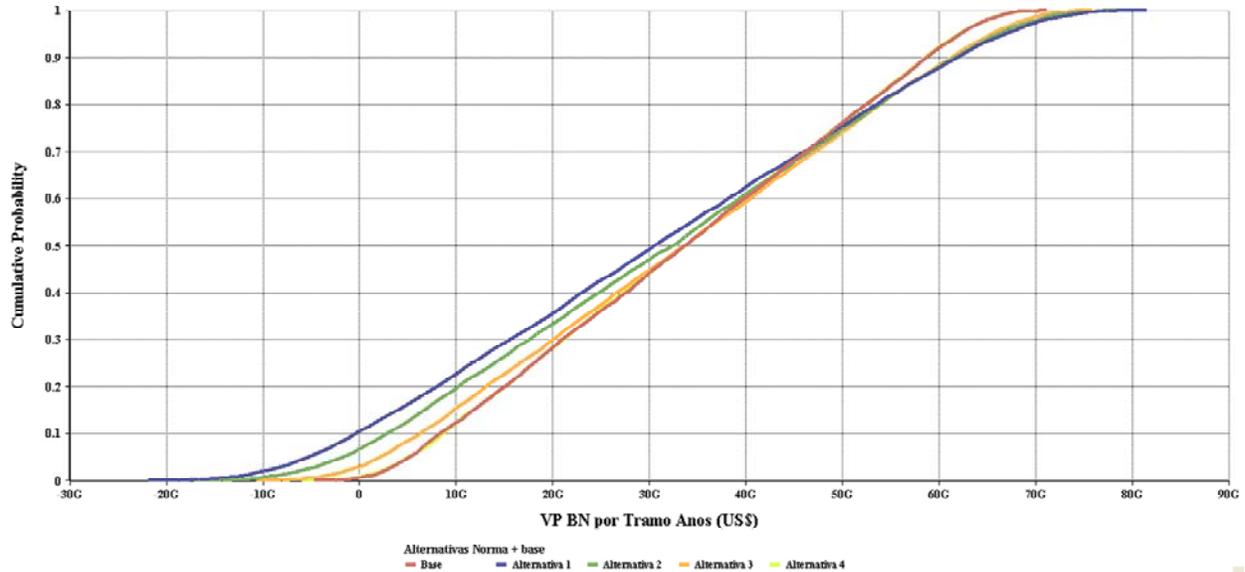
Alternativa	Percentil 50%	(p10% - p90%)
Base	33 700	(8 570 – 58 700)
Alternativa 1	30 600	(-5 – 61 700)
Alternativa 2	32 000	(3 000 – 61 700)
Alternativa 3	33 500	(6 000 – 61 100)
Alternativa 4	33 500	(8 700 – 58 500)

Fuente: Elaboración Propia

Por otra parte, la alternativa 1 presenta un beneficio neto negativo el 10% de los casos. Por otra parte, la alternativa 2 presenta en aproximadamente el 7% de los casos presenta un beneficio neto negativo. En el caso de la alternativa 3, existe una probabilidad del 3% de presentar un beneficio neto negativo. La alternativa que presenta la menor probabilidad de presentar un beneficio neto

negativo corresponde a la alternativa 4, con menos de un 1% de los casos, como se aprecia en la siguiente figura.

Figura 1-11: Funcion de Probabilidad Acumulada del Beneficio Neto para el período 2012-2041 (Millones de USD)



**Nota:** el gráfico indica en el eje Y la probabilidad de que el valor real del beneficio neto sea menor que el valor indicado en el eje X. Por ejemplo, para todas las alternativas, la probabilidad de que el beneficio neto sea menor de aproximadamente 46 mil millones de dólares es de 0.7.

Con respecto a la distribución de los beneficios y costos totales, la población es el sector que recibe los mayores beneficios. En los costos, si bien las diferencias no son tan marcadas, el sector privado y la población asumen la mayor parte. La Tabla 1-15 resume el valor presente de beneficios y costos totales detallado por agente económico.

Tabla 1-15: VP de los Beneficios y Costos distribuidos por agente económico (Millones de USD)

Item	Base	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
<b>Beneficios</b>					
Privados	1,809	2,197	2,105	1,986	1,806
Estado	5,428	6,591	6,316	5,959	5,417
Población	37,999	46,139	44,215	41,711	37,918
<b>Total</b>	<b>45,237</b>	<b>54,928</b>	<b>52,637</b>	<b>49,656</b>	<b>45,140</b>
<b>Costos</b>					
Privados	2,910	9,151	6,820	6,275	4,913
Estado	2,370	6,331	5,435	4,449	3,153
Población	6,021	8,139	7,772	4,934	3,186
<b>Total</b>	<b>11,301</b>	<b>23,621</b>	<b>20,027</b>	<b>15,658</b>	<b>11,252</b>

Fuente: Elaboración propia a partir de distribución propuesta por DICTUC (2001)

Con respecto a beneficios se asumió la distribución propuesta por DICTUC (2001), en donde un 4% de los beneficios corresponden a ahorros de costos en atenciones hospitalarias en el sector privado, un 12% a ahorros de costos en atenciones hospitalarias en el sector público y un 84% a la disposición a pagar de la población por evitar el malestar y sufrimiento generado por eventos de morbilidad y mortalidad asociados a la contaminación atmosférica.

## Conclusiones

Este estudio ha realizado una evaluación social de diferentes alternativas para una norma para  $PM_{2.5}$ , incorporando la mejor información disponible actualmente para concentraciones ambientales, emisiones contaminantes, costos de reducción y beneficios de abatimiento del material particulado.

El estudio incluyó las siguientes actividades:

1. Identificar y caracterizar las principales fuentes emisoras de material particulado fino en el país, las tecnologías de reducción disponibles y los costos asociados a dichas tecnologías, para las distintas situaciones típicas de contaminación que se dan en el país.
2. Analizar posibles niveles de norma en base a las recomendaciones de la OMS, y a la normativa existente en el mundo (Norma de EEUU, Australia, México entre otras) y a las discusiones que se están realizando en la Comunidad Europea.
3. Evaluar los costos y beneficios que tendría la introducción de una norma de  $PM_{2.5}$  en el país para diferentes niveles y distintos plazos de cumplimiento.

La evidencia científica ha mostrado que la exposición al material particulado (PM) suspendido en el aire tiene efectos perjudiciales para la salud de las personas, tanto en los países desarrollados como en desarrollo, existiendo una creciente evidencia de que las partículas más finas del material particulado ( $PM_{2.5}$ ) tienen un impacto en la salud mayor. Los efectos de la salud son amplios, pero se producen particularmente en el sistema respiratorio y cardiovascular, afectando a toda la población. (OMS, 2005).

Por otra parte la evidencia científica actual ha demostrado que no se puede proponer niveles de contaminación atmosférica que ofrezcan protección completa contra los efectos perjudiciales del material particulado  $PM_{10}$  y el material particulado fino  $PM_{2.5}$ . El antiguo paradigma de que existe una concentración bajo la cual no existen efectos nocivos para la salud (el llamado 'umbral') ha sido consistentemente desmentido por los resultados de los estudios científicos modernos. De este modo, al no existir un nivel seguro, las normas deben tender a los niveles más bajos posibles, dadas las limitaciones, capacidades y prioridades de la salud pública locales (OMS, 2005)

Respecto a los riesgos individuales, se mantiene la conclusión que el impacto de la exposición de largo plazo a  $PM_{2.5}$ , produce un riesgo de muerte para adultos mayores dos veces superior al de accidentes de tránsito, para el caso de Santiago, y aún mayor en otras localidades como Tocopilla

De acuerdo a los antecedentes anteriores, se justificaría la adopción de niveles de norma para el material particulado fino de entre los más bajos observados internacionalmente. Con esto y tomando en cuenta las consideraciones del estudio anterior realizado por el consultor, respecto a

lograr niveles de exposición cada vez menores, en este estudio se considera alcanzar para el año 2032 el objetivo de exposición recomendado por la OMS ( $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), en tres de las cuatro alternativas elegidas para la norma anual de  $\text{PM}_{2.5}$ .

Con respecto a los costos y beneficios, la implementación de la norma de  $\text{PM}_{2.5}$  produce beneficios sociales netos positivos en todos los casos analizados para el percentil 50 y 90. En particular, para el percentil 50 el beneficio neto de todas las alternativas analizadas tienen órdenes de magnitud similares.

La población general es el sector que recibe la mayor parte de los beneficios. Para los costos, el sector privado y la población son los sectores que asumen la mayor parte de los costos, aunque las diferencias entre los distintos agentes económicos no es tan marcada.

La estimación de costos y beneficios es un proceso lleno de incertidumbre. Debido a eso, hemos realizado el análisis considerando cuantitativamente la incertidumbre cuando ha sido posible. Aún así, el presente análisis puede ser conservador, subestimando beneficios y sobre-estimando costos.

Con respecto a los costos, hay que mencionar que estos generalmente han sido sobre-estimados, debido a las siguientes razones:

1. los costos de control de emisiones podrían disminuir más de un 1% anual como fue considerado en el análisis.
2. la renovación natural del parque de vehículos no fue considerado en el Estudio. Esto hace caer los costos ya que los nuevos vehículos son menos contaminantes que los antiguos, pero a un precio similar.

En el caso de los beneficios, estos podrían estar sub-estimados, por las siguientes razones:

1. En este análisis no se considero la disminución de emisiones de precursores de ozono. Muchos de los precursores de  $\text{PM}_{2.5}$  secundario son también precursores de ozono ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{COV}$ ,  $\text{CO}$ ), por lo tanto la reducción de estos precursores tiene como efecto una disminución de los niveles de  $\text{O}_3$ , que generan beneficios adicionales. Estos beneficios no han sido considerados.
2. Para un plazo de 30 años es esperable que Chile deba adoptar medidas de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Estas medidas tienen sinergias con las medidas de reducción de material particulado que no fueron consideradas en el análisis. Esta interacción se traduce en una menor reducción requerida por la norma de  $\text{PM}_{2.5}$ , y por lo tanto en una mejor medida de beneficio neto (es necesario mencionar que los beneficios marginales son constantes, mientras que los costos marginales son cuadráticos, por lo que reducciones mayores tienen menor beneficio neto)

A pesar de las simplificaciones realizadas en el análisis, los resultados obtenidos en el estudio presentan una estimación razonable a nivel estratégico que cumple con el objetivo de proveer antecedentes para la realización del AGIES correspondiente.

Del análisis global se concluye que parece adecuado controlar específicamente la fracción fina del material particulado, ya que los beneficios exceden los costos de control y la evidencia epidemiológica muestra, con un alto grado de certeza, que el impacto del  $\text{PM}_{2.5}$  es más alto que el de la fracción gruesa. Por lo tanto, el consultor recomienda iniciar el proceso de normalización de  $\text{PM}_{2.5}$ .

Con respecto a cual de las alternativas analizadas es la más conveniente socialmente, el análisis muestra que las alternativas 3 y 4 presentan los mayores beneficios sociales netos, pero por otra parte muestra que las alternativas 1 y 2 evitan un mayor número de eventos de mortalidad y morbilidad a mayores costos, por lo que debe ser la autoridad la que deberá definir cuál alternativa será más beneficiosa considerando todos los antecedentes entregados por este Estudio.

Del análisis de sensibilidad, al comparar los resultados obtenidos en el Estudio, en que el análisis de costos y beneficios se realizó completando la información de concentraciones para las ciudades sin datos disponibles, versus la situación en que se realiza el análisis considerando sólo las ciudades con información disponible, se concluye la importancia de realizar un mayor número de campañas de monitoreo en las localidades sin información que permitirían completar el análisis y determinar si otras ciudades no monitoreadas actualmente presentan problemas de contaminación relevantes. (para mayor detalle de este análisis ver Anexo V)

## 1. Antecedentes

La investigación y regulación acerca del material particulado y sus efectos en salud han tenido un crecimiento explosivo a nivel mundial durante los últimos 15 años como consecuencia de la gran preocupación que existe en el mundo por los niveles de contaminación atmosférica y la evidencia que existe con respecto a sus efectos en la salud de la población expuesta a ellos.

El instrumento de gestión ambiental utilizado ampliamente en el mundo entero para regular la contaminación corresponde a las normas primarias de calidad ambiental, que definen un nivel máximo de concentración al cuál se expone a la población y cuyo objetivo general es proteger la salud de ésta. Para establecer estos niveles se requiere conocer los impactos sobre la salud de la población de diferentes concentraciones de contaminación atmosférica y definir claramente qué se entiende por proteger la salud de la población.

Diferentes países usan distintos criterios para establecer las normas primarias de calidad. Por ejemplo, en EE.UU., el Congreso mandató a través del Acta del Aire Limpio de 1970 a la Agencia de Protección Ambiental (USEPA) a establecer niveles “*que protejan la salud de la población más sensible con un margen de seguridad adecuado*”. En Chile, la Ley de Bases Generales del Medio Ambiente establece en su artículo 2º, inciso n) lo siguiente: “*Norma Primaria de Calidad Ambiental: aquélla que establece los valores de las concentraciones y períodos, máximos o mínimos permisibles de elementos, compuestos, sustancias, derivados químicos o biológicos, energías, radiaciones, vibraciones, ruidos o combinación de ellos, cuya presencia o carencia en el ambiente pueda constituir un riesgo para la vida o la salud de la población.*” Ambos casos pretenden proteger la salud de la población, pero con criterios expresados de diferente manera: uno con un “adecuado margen de seguridad” y el otro a través de evitar situaciones que puedan “constituir un riesgo para la vida o la salud de la población.”

A pesar de que el lenguaje del legislador difiere, existen dos grandes tendencias en la evolución de la normativa del material particulado a nivel mundial. La primera tiene relación con el criterio utilizado para la dictación de nuevas regulaciones o para la actualización de regulaciones existentes y la segunda que tiene relación con el nivel y tamaño del material particulado normado.

Actualmente la evidencia científica señala que no se puede proponer valores guía que ofrezcan protección completa contra los efectos perjudiciales del material particulado  $PM_{10}$  y material particulado fino  $PM_{2,5}$ , ya que no se han identificado umbrales. Al contrario, el proceso de fijar normas debe alcanzarlas concentraciones más bajas posibles, dadas las limitaciones, capacidades y prioridades de la salud pública locales<sup>8</sup>. Es así como en la actualidad Estados Unidos ha adoptado un enfoque basado en riesgos para definir y actualizar sus normas con respecto a distintos contaminantes. Este enfoque está fundamentado en la necesidad social de definir los límites al riesgo que la sociedad considera aceptable imponer a sus miembros.

Con respecto al diámetro aerodinámico del material particulado, la tendencia internacional ha evolucionado hacia normas progresivamente más estrictas y al control de partículas cada vez más finas. De esta manera se observa que niveles permitidos para  $PM_{2,5}$ , vigentes en los países que

---

8 Guías OMS 2005

controlan esta fracción, se encuentran entre 35 y 12  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  anual (con la excepción de Australia que exige concentraciones de 8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), aún cuando las recomendaciones de la OMS son 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  de promedio anual. Por otra parte, la evidencia epidemiológica muestra, con un sólido grado de certeza, que el impacto del  $\text{PM}_{2.5}$  es más alto que el de la fracción gruesa, lo que apoya la tendencia internacional de normar este contaminante.

Chile tiene actualmente una norma primaria de calidad ambiental para  $\text{PM}_{10}$ , por lo cual se ha iniciado un proceso de análisis y estudio de la implementación de una norma de calidad primaria que regule al  $\text{PM}_{2.5}$  en forma independiente<sup>9</sup>. Es así como el 5 de Diciembre del 2006 el Consejo Directivo de CONAMA decidió retomar el establecimiento de una norma para el  $\text{PM}_{2.5}$  incorporada en el cuarto programa priorizado de normas del 26 de Marzo de 1999. Es en este contexto que el consultor desarrolló para CONAMA el estudio “Análisis de antecedentes para la evaluación de escenarios en la elaboración de la norma de calidad primaria de  $\text{PM}_{2.5}$ ” cuyo objetivo fue la revisión de antecedentes relativos al establecimiento de un estándar de  $\text{PM}_{2.5}$  en Chile. De este análisis, se concluyó que parece adecuado controlar específicamente la fracción fina, y se propusieron algunos valores posibles para una eventual norma.

En el estudio anteriormente citado, se realizó una exhaustiva recopilación de estándares para  $\text{PM}_{2.5}$  en el mundo y su correspondiente estándar de  $\text{PM}_{10}$ , cuando existía. Adicionalmente se analizó para cuatro ciudades del país, la información existente de concentraciones de  $\text{PM}_{10}$  y  $\text{PM}_{2.5}$ , las fuentes de estos contaminantes, y las potenciales opciones para controlarlo, estimando un costo aproximado para ellos. Para estas cuatro ciudades se analizaron las mejoras en salud adicionales de la norma de  $\text{PM}_{2.5}$  con respecto a los que ya provee la norma vigente implícita.

Para el desarrollo de este análisis se identificaron y caracterizaron las principales fuentes emisoras de material particulado fino en el país, las tecnologías de reducción disponibles y los costos asociados a dichas tecnologías, para las distintas situaciones típicas de contaminación en el territorio nacional. Se analizaron los posibles niveles de norma en base a las recomendaciones de la OMS, y a la normativa existente en el mundo (Norma de EEUU, Australia, México entre otras) y a las discusiones que se están realizando en la Comunidad Europea y finalmente se evaluaron los costos y beneficios que tendría la introducción de una norma de  $\text{PM}_{2.5}$  en el país para diferentes niveles y distintos plazos de cumplimiento.

De este primer acercamiento en la evaluación de la conveniencia social de adoptar una norma de calidad primaria para el material particulado fino ( $\text{PM}_{2.5}$ ), se concluyó que parece adecuado controlar específicamente la fracción fina, o por el contrario, no existiría ninguna justificación para no hacerlo.

Es importante destacar que la Ley 19.300 de Bases del Medio Ambiente establece la necesidad de realizar un análisis técnico y económico dentro del proceso de dictación de normas. En tanto, el reglamento para la dictación de normas de calidad y emisión (D.S.Nº93/95 MINSEGPRES) especifica que este análisis "deberá evaluar los costos y beneficios para la población, ecosistemas o especies directamente afectadas o protegidas; los costos y beneficios de los emisores que deberán cumplir con la norma; y los costos y beneficios para el Estado como responsable de la

---

<sup>9</sup> Como el  $\text{PM}_{2.5}$  está incluido dentro del  $\text{PM}_{10}$ , la regulación de esta última también regula indirectamente el  $\text{PM}_{2.5}$ . Sin embargo, esta regulación es afectada por la presencia de la fracción gruesa,  $\text{PM}_{10-2.5}$ .

fiscalización del cumplimiento de la norma". Si bien la normativa chilena exige un análisis general del impacto económico y social (AGIES) para la dictación de normas, no especifica la metodología del análisis ni el criterio que se debe usar para estimar el impacto. Cabe destacar que la ley exige evaluar costos y beneficios, pero no menciona la realización de un análisis costo beneficio y tampoco señala que los beneficios deben ser mayores que los costos para dictar la norma.

En dicho contexto, el presente estudio tiene como objetivo fundamental la evaluación económica y social actualizada de la aplicación del anteproyecto de norma de  $PM_{2.5}$ , profundizando el análisis realizado en el estudio anterior al incorporar información actualizada y mejorada de concentraciones, emisiones, costos y beneficios.

## 1.1 Objetivos del estudio

El objetivo general del estudio es evaluar la conveniencia social de adoptar una norma de calidad primaria para el material particulado fino ( $PM_{2.5}$ ) adicional a la actual norma de  $PM_{10}$  que rige en el país, analizando el nivel y el plazo de cumplimiento de esta norma.

### 1.1.1 Objetivos Específicos

Los objetivos específicos del estudio son los siguientes:

1. Actualizar la información utilizada para el desarrollo del estudio anterior y extender la evaluación realizada a otras ciudades que dispongan de información. Para aquellas ciudades que no cuenten con datos de mediciones, analizar a qué ciudades con información pueden ser homologadas.
2. Analizar la información existente de los niveles de  $PM_{2.5}$  en las ciudades del país que se tenga datos de las fracciones gruesa y fina de  $PM$ , y que posean más de 40.000 habitantes (ciudades intermedias según observatorio urbano – [www.observatoriourbano.cl](http://www.observatoriourbano.cl)). Adicionalmente, analizar la información acerca de los niveles de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ , estableciendo una relación entre ellos.
3. Profundizar en la estimación de costos para la zona norte del País, agregando costos de otras dos ciudades del norte, considerando una ciudad que no sea una mega fuente (Antofagasta y Calama). Se contrastarán los resultados obtenidos con la curva de costos estimada para Tocopilla (mega fuente) para destacar las diferencias en costos de reducción.
4. Profundizar en la estimación de costos, agregando costos de una ciudad en la Zona Central en a que no hayan sido tomadas muchas medidas de control aún. (Talca o Rancagua)
5. Evaluar los costos y beneficios que tendría la introducción de una norma de  $PM_{2.5}$  en el país para diferentes niveles y distintos plazos de cumplimiento.
6. Suponiendo la norma diaria más eficiente, estudiar en que ciudades sería activa y que norma sería más exigente aún (beneficios extra), la diaria o la anual.

7. Agregar al análisis los beneficios de visibilidad y materiales por  $PM_{2.5}$ , a partir de los datos de visibilidad que la Dirección Meteorológica otorgará para diferentes puntos de Santiago.
8. Realizar un análisis distributivo de las concentraciones de material particulado  $PM_{2.5}$  a nivel de zonas (grupos de comunas) definidas en base a criterios socio económicos para la ciudad de Santiago.

## 1.2 Organización del Informe

El presente informe consta de dos capítulos. El primero de ellos presenta las alternativas de norma para el material particulado fino analizadas y las consideraciones tomadas en cuenta en el diseño recomendado para la implementación de ésta en el tiempo. Además, en una segunda parte, se analiza brevemente la situación del material particulado en Chile.

En el segundo capítulo se desarrolla un análisis de la conveniencia social de la implementación de la norma desde dos perspectivas: riesgos individuales y costos y beneficios sociales, detallando la metodología utilizada en el Estudio.

## 2. Alternativas y Consideraciones sobre Normativa de PM<sub>2.5</sub>

En la siguiente sección se detallan las alternativas analizadas en el estudio y las consideraciones tomadas en cuenta en el diseño de las alternativas.

### 2.1 Alternativas de norma a analizar

El objetivo principal de un AGIES es evaluar los impactos económicos y sociales de la implementación de una nueva norma. Sin embargo, para el tomador de decisiones es esencial conocer los impactos de diferentes alternativas de norma, es decir, evaluar distintos escenarios que le permitan, en base a los resultados obtenidos, tomar una mejor decisión.

Este estudio considera cuatro escenarios de norma para analizar las cuales se presentan en la Tabla 2-1.

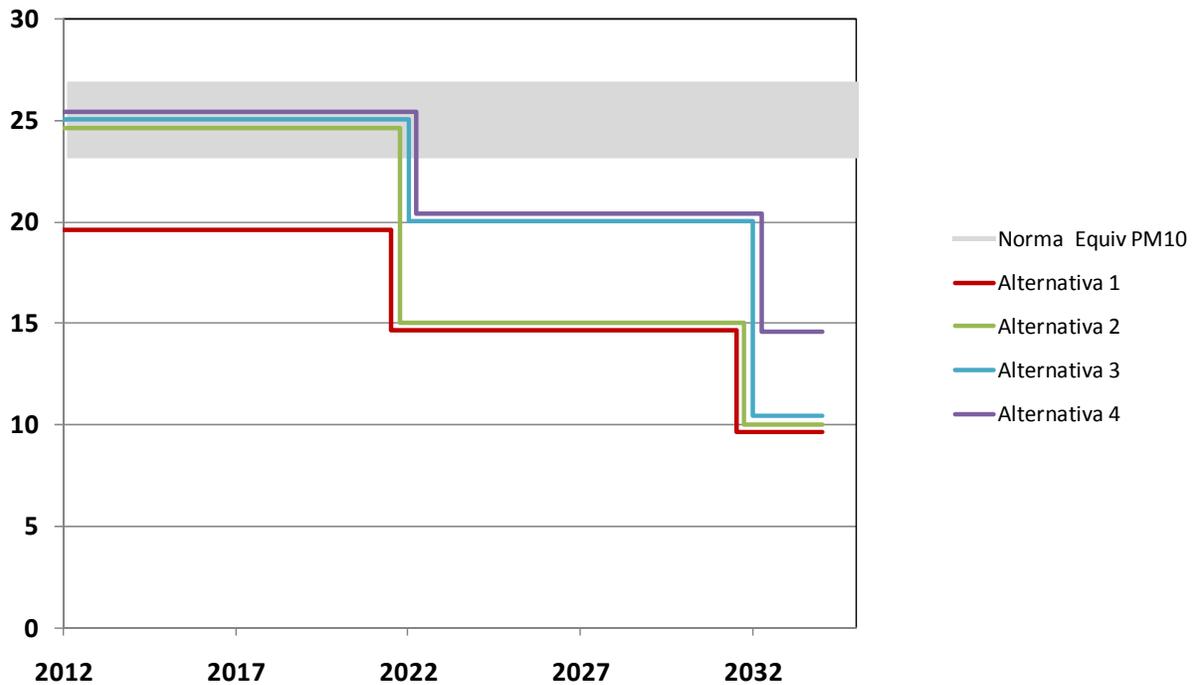
Tabla 2-1: Alternativas de norma analizadas (valores anuales en µg/m<sup>3</sup>)

Año Vigencia	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
2012	20	25	25	25
2022	15	15	20	20
2032	10	10	10	15

Fuente: Elaboración propia

La Figura 2-1 ilustra cada una de las alternativas que serán analizadas en el estudio. En gris se muestra la norma implícita de material particulado fino que impone la norma diaria de PM<sub>10</sub>, que estará vigente de no dictarse la norma de PM<sub>2.5</sub>, y la norma anual, que seguirá vigente independiente de si se dicta o no una norma para el material particulado fino.

Figura 2-1 Representación gráfica de las alternativas de norma para PM<sub>2.5</sub> evaluadas



Fuente: Elaboración propia

### 2.1.1 Norma diaria

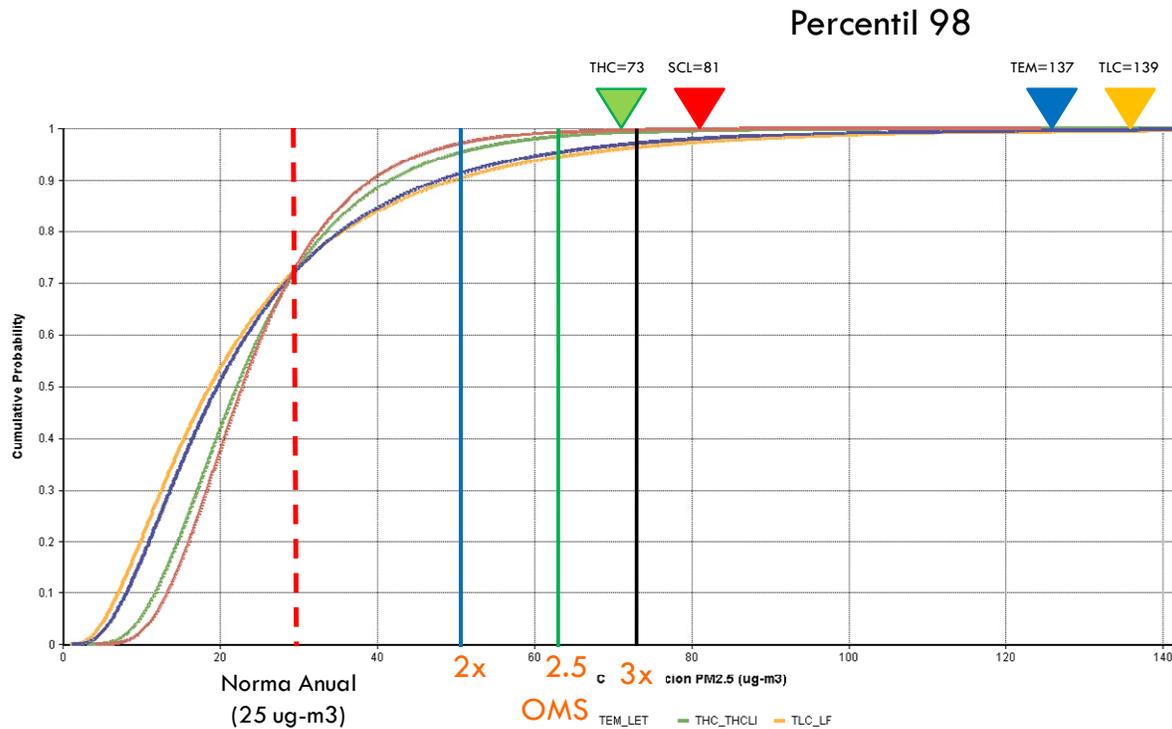
Se analizaron tres alternativas de norma diaria para PM<sub>2.5</sub> considerando una razón entre la norma diaria (percentil 98) y la norma anual de 2x, 2.5x y 3x. A continuación se presentan los niveles de norma diaria consideradas en el estudio.

Tabla 2-2 Alternativas de Norma Diaria

Norma Anual PM2.5	Norma Diaria PM2.5		
	2x	2.5x	3x
25	50	63	75
20	40	50	60
15	30	38	45
10	20	25	30

Fuente: Elaboración propia

A continuación se presenta de manera gráfica las distintas alternativas para norma diaria analizadas, para cuatro ciudades de Chile: Temuco, Talcahuano, Santiago y Talca.



La alternativa dos (2.5x) corresponde a la recomendación de la OMS para la norma diaria. En la figura anterior el nivel guía de la OMS corresponde a la línea verde, de esta manera todas las ciudades presentadas en la figura presentarían días sobre este nivel de concentración diaria, estando obligadas a reducir los días sobre norma que corresponden a toda la cola de la distribución que se encuentra sobre la línea verde.

## 2.2 Temas Transversales con respecto a la Norma

A continuación se describen algunos de los factores más relevantes, rescatados de la discusión con respecto al diseño de la norma realizada con la contraparte técnica, que fueron considerados en la definición de las alternativas evaluadas.

### 2.2.1 Gradualidad

Históricamente, las normas de calidad en Chile han sido fijadas con un nivel único, sin una introducción gradual. El plazo de cumplimiento de la norma, en el caso de las localidades que al momento de dictación de la norma no cumplen con ella, ha sido definido en el Plan de Descontaminación respectivo<sup>10</sup>. La única experiencia de una norma que contempla una variación en el tiempo es la norma de PM<sub>10</sub>, que considera una reducción en su valor diario en el año 2012 si es que para ese año no se ha dictado una norma de PM<sub>2.5</sub>.

<sup>10</sup> No nos referimos aquí al caso de latencia o de aumento gradual de concentraciones que llevan a la latencia, ya que es similar.

Este enfoque tiene el problema de que no reconoce que el cumplimiento de la norma es, en general, un proceso que toma una cantidad de tiempo considerable, ya que incluye todos los plazos para la declaración de zona saturada, la formulación y dictación del respectivo Plan de Descontaminación, y luego la aplicación y cumplimiento de las medidas contenidas en el Plan, lo que en la práctica puede tomar un tiempo de hasta 5 años.

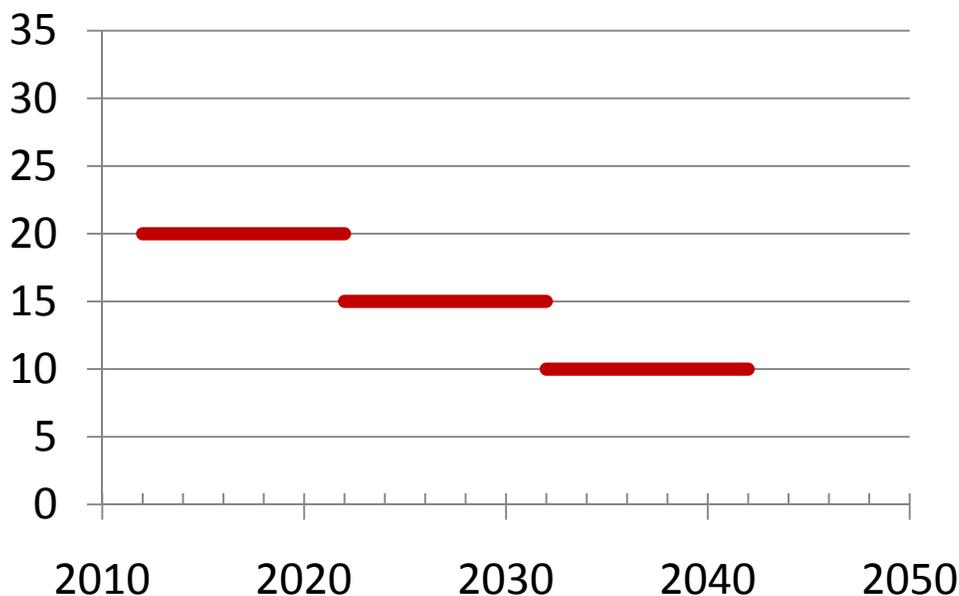
La revisión de la literatura muestra que la práctica internacional ha ido migrando hacia un esquema de normas crecientemente estrictas en el tiempo. Las Guías de la OMS reconocen esto explícitamente, recomendando valores cada vez más bajos para los objetivos de calidad ambiental. La regulación de la Unión Europea fija, además de un valor límite decreciente en el tiempo, disminuciones graduales de los niveles de contaminación, aún para lugares que cumplan lo exigible legalmente, de manera de reducir la exposición de la población.

El tener los plazos de aplicación definidos en la norma presenta varias ventajas:

- Provee certeza jurídica a la autoridad y las fuentes con respecto a los niveles de la norma en el futuro
- Permite adelantar los análisis y planes para comenzar a aplicarlos apenas se haga activo el nuevo nivel
- Previene la usurpación de la capacidad de carga de una cuenca atmosférica con respecto a la norma actual, dando un instrumento a la autoridad para exigir desde antes de la aplicación formal de la norma compensaciones o limitaciones a las emisiones

En la siguiente figura se presentan los niveles propuestos de norma anual para la alternativa 1 analizada en el estudio.

Figura 2-2 Representación gráfica de los niveles máximos para la norma anual de la Alternativa 1 evaluada



Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar de la figura anterior, las alternativas de norma incluidas en el estudio fueron construidas bajo este criterio de gradualidad, lo que implica diferentes niveles de norma en el tiempo (niveles intermedios de cumplimiento), de manera que permitan alcanzar el nivel de norma objetivo en el año 2030.

### **2.2.2 Planes de Prevención y Descontaminación**

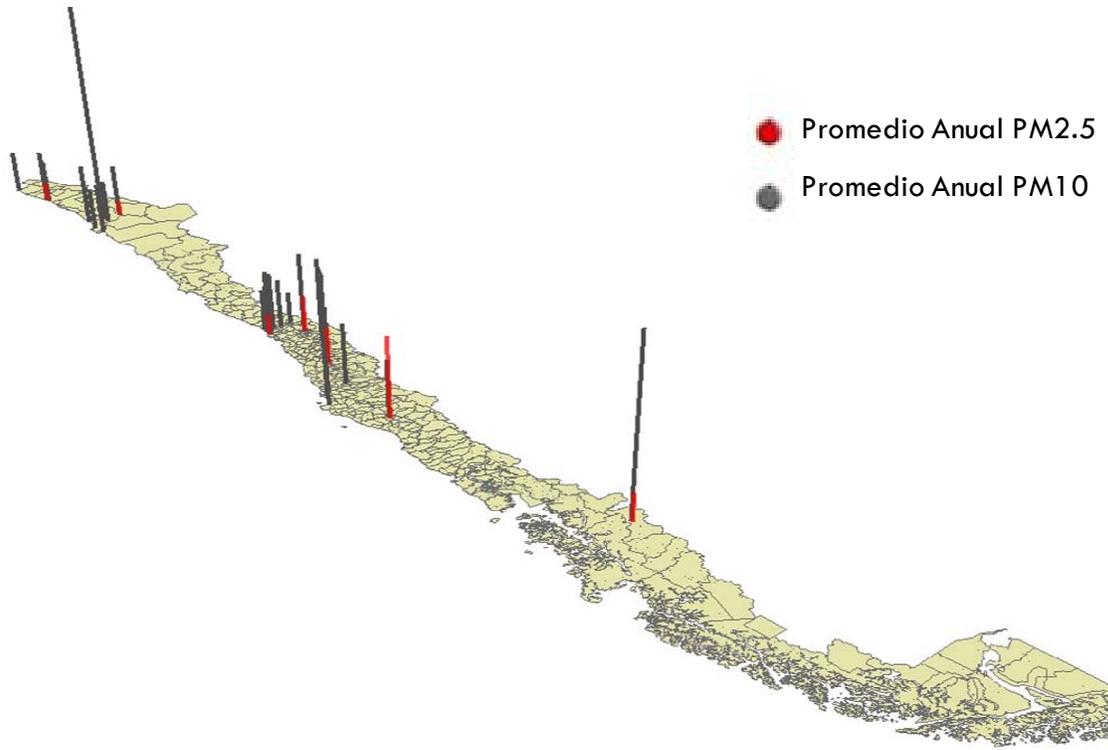
Bajo un esquema de norma gradual, los planes de prevención y de descontaminación permiten operacionalizar el principio de prevención. Como se sabe de antemano cual será la norma de calidad exigible en el futuro, este criterio permitiría cambiar el enfoque actual de planes de descontaminación por el de planes de cumplimiento o de acción para alcanzar los niveles futuros propuestos.

Por otra parte este enfoque permitiría cambiar la manera en que se declara zona saturada: no sólo se basaría en el 80% del nivel de la norma (dimensión nivel concentración), sino que también en base al valor futuro de la norma (dimensión tiempo). Como ya se mencionó, una vez declarada una ciudad como zona saturada pasa un período de hasta cinco años desde su declaración hasta la puesta en marcha del plan de descontaminación, este intervalo de tiempo debe ser tomado en cuenta en el diseño y la evaluación de la norma.

### 3. Situación del Material Particulado en Chile

En Chile se realizan monitoreos de material particulado ( $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ ) en distintas comunas del país. Como se puede apreciar en la figura Figura 3-1, la ubicación de los monitores se concentran en sólo algunas comunas o zonas, mientras una extensa parte del país no cuenta con mediciones.

Figura 3-1 Ubicación de Monitores y concentraciones de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  en Chile



Fuente: Elaboración propia a partir de datos entregados por CONAMA (2008)

En la actualidad, en base a datos de monitoreo entregados por CONAMA, varias comunas de Chile no cumplen con la norma anual de  $PM_{10}$ , siendo el área metropolitana de Rancagua la localidad con la mayor concentración anual de  $PM_{10}$  durante el año 2007, superando la norma en un 44%.

Para el caso del  $PM_{2.5}$ , si hoy se aplicara un nivel de norma como el propuesto por la OMS ( $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), ninguna de las áreas de las cuales se tiene información cumpliría con la normativa para este contaminante.

### 3.1 Información base de concentraciones de $PM_{10}$ y $PM_{2.5}$ en ciudades de Chile

Para el análisis se consideró todas las ciudades o localidades que registran mediciones de  $PM_{10}$ - $PM_{2.5}$ , de acuerdo a la información aportada por la contraparte, y que corresponden a aglomeraciones urbanas con más de 40.000 hab. (Definición ciudad intermedia: MINVU, 2008). A esta clasificación califican 13 ciudades de la zona Norte (Arica – Huasco), 22 ciudades de la zona central (La Serena / Coquimbo – Constitución) y 17 ciudades de la zona sur (Curicó – Punta Arenas). En la siguiente tabla se resume las ciudades incluidas en el análisis.

### 3.2 Concentraciones Medias Anuales

A continuación en la Figura 3-2 se presenta las concentraciones de material particulado por ciudad, de acuerdo a información actualizada aportada por la contraparte. Es importante destacar que las concentraciones presentadas corresponden al promedio de las concentraciones medidas del o los monitores existentes en la ciudad, del año más actual de que se disponía información.

Como se puede observar, cerca de 45% de las comunas con información de mediciones no cumplen actualmente con la norma anual de  $PM_{10}$ , considerando sólo aquellas comunas con mediciones para los años 2007 o 2008, siendo el área metropolitana de Rancagua y Santiago las localidades con la mayor concentración anual de  $PM_{10}$  durante el año 2007, superando la norma en un 48% y en un 38% respectivamente.

Para el caso del  $PM_{2.5}$ , todas las áreas metropolitanas que cuentan con datos de mediciones presentan concentraciones anuales superiores al nivel propuesto por la OMS ( $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Las áreas con los mayores niveles de concentración corresponden a Talca y Gran Santiago, superando la norma en más de un 200%.

Figura 3-2 Promedio anual de concentraciones de material particulado por comuna

Región	Area Metropolitana	Comuna	PM10		PM2.5		Razón
			Año	Promedio Anual (ug-m3)	Año	Promedio Anual (ug-m3)	PM2.5-PM10
XV	Arica	Arica	2008	41.3			
I	Alto Hospicio	Alto Hospicio	2008	50.2	2008	18.2	0.36
	Pozo Almonte	Pozo Almonte	2007	39.0			
II	Antofagasta	Antofagasta	2007	54.9			
	Calama	Calama	2007	49.5	2007	14.5	0.29
	Mejillones	Mejillones	2006	39.1			
	Sierra Gorda	Sierra Gorda	2005	41.3			
	Tocopilla	Tocopilla	2006	56.0			
V	La Calera	La Calera	2007	52.6			
	Cabildo	Cabildo	2007	20.6			
	Gran Valparaíso	Con Con	2007	44.6	2007	18.7	0.42
	Gran Valparaíso	Quilpué	2007	44.4			
	Gran Valparaíso	Viña del Mar	2006	40.2			
	Putendo	Putendo	2007	32.6			
	Llaillay	Llaillay	2007	38.5			
	Puchuncavi	Puchuncavi	2007	36.6			
	Quillota	Quillota	2007	51.9			
	Catemu	Catemu	2007	54.2			
	Los Andes	Los Andes	2007	28.1			
RM	Gran Santiago		2007	69.1	2006	31.7	0.46
VI	Gran Rancagua	Rancagua	2007	74.2			
	Codegua	Codegua	2007	66.2			
	Requinoa	Requinoa	2007	56.2			
	Rengo	Rengo	2007	62.8			
	San Fernando	San Fernando	2007	52.6			
VII	Talca	Talca	2007	49.2	2007	32.8	0.66
VIII	Gran Chillán	Chillán	2007	51.7			
	Gran Concepción	Coronel	2007	50.9			
	Gran Concepción	Hualpén	2007	39.5			
	Gran Concepción	Penco	2007	41.4			
	Gran Concepción	San Pedro de la Paz	2007	56.7			
	Gran Concepción	Talcahuano	2007	56.6		24.0	0.42
	Arauco	Arauco	2008	43.0			
IX	Gran Temuco	Padre Las Casas	2004	46.0			
	Gran Temuco	Temuco	2007	51.3			

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de monitoreo CONAMA (2008)

Para las ciudades, consideradas en el análisis sin información de concentraciones anuales se les asignó un nivel de concentración de PM<sub>10</sub> de acuerdo a los siguientes criterios:

1. Si la ciudad presenta un nivel de actividad similar a una ciudad con un nivel medido cercano a la norma anual vigente se le asignó el nivel de la norma (50 µg/m<sup>3</sup>).
2. Si la ciudad presenta un nivel de actividad intermedio y no presenta condiciones topográficas y meteorológicas singulares que puedan implicar problemas de ventilación se le asignó un nivel en el 75% de la norma anual vigente (38 µg/m<sup>3</sup>).
3. Si la ciudad presenta un nivel de actividad menor y no presenta condiciones topográficas y meteorológicas singulares que puedan implicar problemas de ventilación se le asignó un nivel en el 50% de la norma anual vigente (25 µg/m<sup>3</sup>).

### 3.3 Razón entre $PM_{2.5}$ y $PM_{10}$

La fracción predominante del material particulado varía de acuerdo a la zona del País. En la zona Norte de Chile, la fracción gruesa es el componente predominante del material particulado, la razón entre la fracción fina y la fracción gruesa para esta zona presenta valores entre [0.06 – 0.36], en cambio la razón entre estas fracciones en la zona Central es cercano al 0.5. En la zona Sur, la situación es inversa a lo que ocurre en el Norte del País: la fracción fina es la que predomina en la composición del material particulado con una razón cercana al 0.7. Es importante destacar que este valor resulta mayor en períodos de invierno en que el  $PM_{2.5}$  aumenta por el uso de leña en la región. Para la ciudad de Talca esta relación puede llegar a ser 0.9 en el percentil 98 de los casos. Por lo tanto la razón obtenida para la zona Sur, de acuerdo a los datos disponibles, presenta valores entre [0.52 – 0.9].

A partir de los datos obtenidos se caracterizó cada una de las zonas del país con respecto a la fracción fina y la fracción gruesa, de acuerdo al criterio presentado en la tabla siguiente.

Tabla 3-1: Relación entre la fracción fina y gruesa del  $PM_{10}$  por zona de Chile

Zona	Media Anual	Percentil 98	Fuente
<b>Norte</b>	0.18	0.18	Monitoreo Calama
<b>Centro - Costa</b>	0.46	0.58	Monitoreo Gran Valparaíso
<b>Centro - Interior</b>	0.50	0.60	Monitoreo Rancagua
<b>Sur - Leña</b>	0.52	0.90	Monitoreo Temuco

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de monitoreo CONAMA (2008)

En base a esta información es posible determinar la concentración de  $PM_{2.5}$  para ciudades sin datos de monitoreo.

#### 4. Metodología utilizada en el estudio

Existen dos tipos de análisis posibles de utilizar para evaluar la conveniencia social de la definición y aplicación de una norma:

- Riesgos
- Costos y Beneficios

El criterio basado en riesgos se basa en la limitación de los riesgos que la sociedad considera aceptable imponer en sus miembros (debemos recordar que muy pocas veces existe la posibilidad de lograr un riesgo neto cero). Este nivel de riesgo es independiente del número de personas expuestas, ya que se define en forma individual.

Por el contrario, el criterio basado en costos y beneficios sociales es dependiente del número de personas expuestas al riesgo, en este caso, a riesgos de mortalidad o morbilidad producto de la contaminación atmosférica. La misma reducción en el nivel de contaminantes atmosféricos producirá un beneficio mayor mientras mayor es el número de personas expuestas. De este modo, descontaminar una ciudad grande tiene más beneficios sociales que descontaminar un pequeño pueblo, por el solo hecho de que el número de personas afectadas es mucho mayor, aun cuando la reducción de riesgo individual sea la misma en ambos casos.

Estos dos criterios aparecen mencionados en la legislación. En la Ley de Bases Generales sobre el medio Ambiente (Ley 19.300), se define la norma primaria de calidad ambiental en el Artículo 2° de la siguiente manera:

*Norma Primaria de Calidad Ambiental: aquélla que establece los valores de las concentraciones y períodos, máximos o mínimos permisibles de elementos, compuestos, sustancias, derivados químicos o biológicos, energías, radiaciones, vibraciones, ruidos o combinación de ellos, cuya presencia o carencia en el ambiente pueda constituir un riesgo para la vida o la salud de la población.*

Sin embargo, el artículo 32 introduce el análisis técnico económico:

*Un reglamento establecerá el procedimiento a seguir para la dictación de normas de calidad ambiental, que considerará a lo menos las siguientes etapas: análisis técnico y económico, desarrollo de estudios científicos, consultas a organismos competentes, públicos y privados, análisis de las observaciones formuladas y una adecuada publicidad. Establecerá además los plazos y formalidades que se requieran para dar cumplimiento a lo dispuesto en este artículo y los criterios para revisar las normas vigentes.*

A su vez, el reglamento para la dictación de normas de calidad ambiental y de emisión, en su Título II, Párrafo 4, exige la realización del AGIES, una vez formulado el anteproyecto de norma:

*Elaborado al anteproyecto de norma, el Director encargará un análisis general del impacto económico y social de la o las normas contenidas en dicho anteproyecto. Este análisis deberá ser evacuado en un plazo de 50 días. En especial, dicho estudio deberá evaluar los costos y beneficios para la población,*

*ecosistemas o especies directamente afectadas o protegidas; los costos y beneficios a él o los emisores que deberán cumplir la norma; y los costos y beneficios para el estado como responsable de la fiscalización del cumplimiento de la norma. Dentro del Plazo de 150 días, la Directora, por resolución fundada, podrá prorrogar o disminuir los plazos establecidos para la preparación de los informes o del anteproyecto de norma. En todo caso, la prórroga no podrá hacerse por más de una vez.*

Considerando estos antecedentes, es que se ha decidido realizar un análisis de los riesgos individuales y de los costos y beneficios de la aplicación de la norma, ya que no hay claridad del criterio a usar para fijar el nivel de concentraciones límite.

Estos dos análisis comprenden entonces las dos dimensiones: individual y social y son complementarios al momento de decidir con respecto a la conveniencia de una u otra alternativa.

## **4.1 Riesgos Individuales**

El criterio basado en riesgos individuales se basa en la limitación de los riesgos que la sociedad considera aceptable imponer a sus miembros. En base a estimaciones de tasas de mortalidad por ciudad obtenidas de INE (2005) y los resultados de riesgo relativo reportados por (Pope and Dockery 2006) se estimó las muertes evitadas y el aumento en la esperanza de vida (EV) por cada  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de  $\text{PM}_{2.5}$  reducidos.

La Tabla 4-1 se presenta el riesgo individual de cuatro de las ciudades en estudio, para adultos mayores de 65 años. El riesgo adicional está referido a la concentración de  $\text{PM}_{2.5}$  recomendada por la OMS que corresponde a  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Si en Santiago se alcanzara concentraciones de  $\text{PM}_{2.5}$  como ésta se evitarían 2800 muertes al año en este grupo de edad<sup>11</sup>.

---

<sup>11</sup> En Santiago, actualmente se tienen 554 muertes en exceso en comparación a un nivel de calidad del aire de  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de  $\text{PM}_{2.5}$  por cada millón de habitantes. Si consideramos que en Santiago habitan cinco millones de personas, se puede inferir que se experimentan aproximadamente 2.800 casos de mortalidad en exceso para este grupo de edad.

Tabla 4-1: Riesgo Individual causas respiratorias y cardiovascular en Adultos mayores de 65 años para cuatro ciudades en estudio. Causa Cardiopulmonar.

Grupo Etareo	65+ años	Concepcion	Santiago	Temuco	Tocopilla
		<i>Tasa Mortalidad (casos por 100.000h/año)</i>			
		1,607	1,831	1,879	2,395
Concentracion	% Aumento Mortalidad	<i>Riesgo en Exceso (per 1 millon)</i>			
10	0.0%	0	0	0	0
15	0.6%	97	111	114	145
20	1.2%	194	222	227	290
25	1.8%	292	332	341	435
30	2.4%	389	443	455	580
35	3.0%	486	554	569	724

Fuente: Elaboración propia en base a datos INE (2005) y Pope and Dockery 2006

En Chile anualmente mueren 2100 personas<sup>12</sup> producto de accidentes de tránsito (considerando víctimas después de 1 día). Si dividimos este número de casos contabilizados por el total de la población en el país, se obtiene el riesgo individual de morir en un accidente de este tipo, que es del orden de 140 casos por millón de personas.

Este valor es equivalente al riesgo en exceso asociado a una exposición  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de un adulto mayor en Tocopilla (con respecto una exposición de  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y al riesgo en exceso asociado a una exposición de  $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$  con respecto una exposición de  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en Santiago (ver Tabla 4-2).

Se puede observar en la Tabla 4-2 que para concentraciones mayores a  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , el factor es siempre mayor que 1 en todas las ciudades analizadas. En Santiago actualmente estamos expuestos a concentraciones mayores a  $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de promedio anual, lo que implica que el riesgo de muerte producto de la contaminación atmosférica es 3 veces mayor que el riesgo de muerte en accidentes de tránsito.

Tabla 4-2: Riesgo en exceso para cuatro ciudades en estudio. Adultos mayores de 65 años

Age group	65+ and older	Concepcion	Santiago	Temuco	Tocopilla
Concentration	% mortality increase	<i>Additional Risk/traffic accidents</i>			
10	0.0%	0.0	0.0	0.0	0.0
15	0.6%	0.7	0.8	0.8	1.0
20	1.2%	1.4	1.6	1.6	2.1
25	1.8%	2.1	2.4	2.4	3.1
30	2.4%	2.8	3.2	3.2	4.1
35	3.0%	3.5	4.0	4.1	5.2

Fuente: Elaboración propia en base a datos INE (2005) y Pope and Dockery 2006

<sup>12</sup> INE (2005) Certificados nacionales de defunción

En la Tabla 4-3 se resume la reducción en la esperanza de vida de hombres y mujeres debido a diferentes escenarios de reducción en la concentración de  $PM_{2,5}$ , de acuerdo a diferentes estudios.

Tabla 4-3: Reducción Esperanza de vida (meses) de hombres y mujeres

Estudio	Delra RR	Reducción $PM_{2,5}$ ( $\mu g/m^3$ )	Reducción Esperanza de vida Hombres (meses)	Reducción Esperanza de vida Mujeres (meses)
ACS- Education adjusted	0,05	5	5,5	6,1
Base	0,033		3,5	4
Harvard 6 Cities	0,08		8,9	9,7
ACS- Education adjusted	0,1	10	11,2	12,2
Base	0,066		7,3	8
Harvard 6 Cities	0,16		17,8	19,2
ACS- Education adjusted	0,15	15	16,7	18
Base	0,099		11,1	12
Harvard 6 Cities	0,24		26,4	28,2

Fuente: Elaboración propia en base a datos INE (2005) y Pope and Dockery 2006

En la capital, actualmente la población está expuesta a una concentración de  $PM_{2,5}$  igual a  $35 \mu g/m^3$ . Esto implica que, si se considera los valores de reducción de esperanza de vida estimados usando como referencia el estudio “Base”, actualmente un habitante de Santiago pierde cerca de 2 años en esperanza de vida con respecto a un escenario en que la concentración de  $PM_{2,5}$  fuera de  $10 \mu g/m^3$ . Por otro lado, si se considera los valores de reducción estimados en base al estudio Harvard 6 Cities, la disminución en esperanza de vida en Santiago sería de hasta 4 años.

Con respecto a riesgos individuales, se concluye que el impacto de la exposición a  $PM_{2,5}$  de largo plazo es alto (actualmente es hasta tres veces mayor al riesgo de muerte en accidentes de tránsito en algunas ciudades como Santiago) y afecta a toda la población (niños, adultos y adultos mayores), justificándose la implementación de los niveles de norma más estrictos observados internacionalmente. Por consiguiente, se recomienda definir como nivel de exposición objetivo para Chile el recomendado por la OMS correspondiente a una concentración media anual de  $10 \mu g/m^3$  que, según la evidencia científica (Dockery et al. (1993) y (Pope et al (2006)), estaría por debajo de la media para los efectos más probables. Por otra parte, debido a que no existe un umbral bajo el cual no se observen efectos a la salud en las personas (PAHO, 2005), se debe perseguir alcanzar niveles de exposición cada vez menores; por lo que, alcanzados los niveles de concentración recomendados actualmente por la OMS ( $10 \mu g/m^3$ ) se debería estudiar la posibilidad de implementar límites aún más estrictos.

### 4.1.1 Reducción de casos anuales

Los impactos de salud considerados en el análisis se presentan en la tabla a continuación.

Tabla 4-4: Impactos en Salud Considerados en el Estudio

Efecto	Causa	Grupo Edad
<b>Mortalidad Prematura</b>	<b>Todas las causas</b>	<b>Todos</b>
	<b>Cardiopulmonares</b>	<b>&gt; 30</b>
<b>Admisiones Hospitalarias</b>	<b>Cardiovasculares</b>	<b>65+</b>
	<b>Respiratorias</b>	<b>Todos</b>
<b>Visitas Sala Urgencia</b>	<b>Causas Respiratorias</b>	<b>Todos</b>
<b>Visitas Médicas</b>	<b>Niños con IRA baja</b>	<b>3 a 15</b>
<b>Otros</b>	<b>Días laborales perdidos</b>	<b>Adultos</b>
	<b>Días con Actividad Restringida</b>	<b>Adultos</b>
	<b>Días con Actividad Restringida Mensual</b>	<b>Adultos</b>

Fuente: Elaboración propia

La reducción en casos anuales de diferentes efectos se estima en base a estudios chilenos e internacionales, y las características de la población expuesta (tasas base de efectos). A continuación se presenta la reducción de casos por Millón de personas por  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  reducido de  $\text{PM}_{2.5}$  (promedio nacional) se presentan en las siguientes tablas.

Tabla 4-5: Reducción de casos por millón de personas por ug/m3 de PM<sub>2.5</sub> reducido

Efecto	Causa	Grupo Edad	Casos en Excesos Unitarios Casos/Millones personas por ug/m3
Mortalidad Prematura	Exp. de largo plazo Todas las causas	Todos	(7 – 40)
	Exp. de largo plazo Cardiopulmonar	>30	(8 – 27)
Admisiones Hospitalarias	Enfermedades Cardiovasculares	Todos	(22 – 54)
	Enfermedades Respiratorias	<65	(29 – 85)
Visitas Médicas	Niños con IRA baja	3 a 15	(138 – 1,100)
Otros	Días laborales perdidos	Adultos	(14,600 – 19,000)
	Días con Actividad Restringida	Adultos	(25,000 – 31,000)
	Días con Actividad Restringida Mensual	Adultos	(42,000 – 58,000)

Fuente: Elaboración propia

## 4.2 Análisis Costo - Beneficio

La metodología utilizada para la estimación de los costos y beneficios sociales considera las siguientes etapas:

1. Proyección de la línea base para cada ciudad
2. Reducción de concentraciones requerida para lograr la norma
3. Estimación de beneficios unitarios por reducción de PM<sub>2.5</sub>
4. Restricción norma diaria activa
5. Estimación de costos sociales por reducción de PM<sub>2.5</sub>
6. Estimación de beneficios netos de la nueva norma

### 4.2.1 Cálculo de Costos y Beneficios para Cada Caso

Para el estudio se analizan dos casos relevantes:

1. El caso base optimizado en que se considera que la norma de PM<sub>2.5</sub> no entra en vigencia, se mantiene la norma de PM<sub>10</sub> anual de 50 µg/m<sup>3</sup> y se aumenta la exigencia a la norma de PM<sub>10</sub> diaria a 120 µg/m<sup>3</sup>.
2. La norma de PM<sub>2.5</sub> entra en vigencia y la norma de PM<sub>10</sub> se mantiene en una exigencia anual de 50 µg/m<sup>3</sup> y en una exigencia diaria de 150 µg/m<sup>3</sup>.

#### 4.2.1.1 Caso Base: Sólo Norma de PM<sub>10</sub>

El caso base del análisis corresponde a un escenario en el cual la norma para material particulado fino no es implementada en Chile. En este caso sólo estaría vigente una norma para PM<sub>10</sub>, que para el caso anual se mantendría en su nivel actual (50 µg/m<sup>3</sup>) mientras que para el caso diario aumentaría su exigencia a partir del año 2012, de 150 µg/m<sup>3</sup> a 120 µg/m<sup>3</sup>.

Las medidas consideradas para cumplir con este límite impuesto por la norma de PM<sub>10</sub> implican reducciones concomitantes de PM<sub>2.5</sub> y sus precursores. De acuerdo con esto es posible determinar la reducción de PM<sub>2.5</sub> obtenida por la norma de PM<sub>10</sub> a través de las medidas consideradas para cumplir esta última que serán implementadas según su costo medio de reducción (ver sección). La Figura 4-1 muestra las curvas de reducción de PM<sub>2.5</sub> obtenidas de una reducción de PM<sub>10</sub> para cada una de las ciudades con información disponible para el caso base analizado.

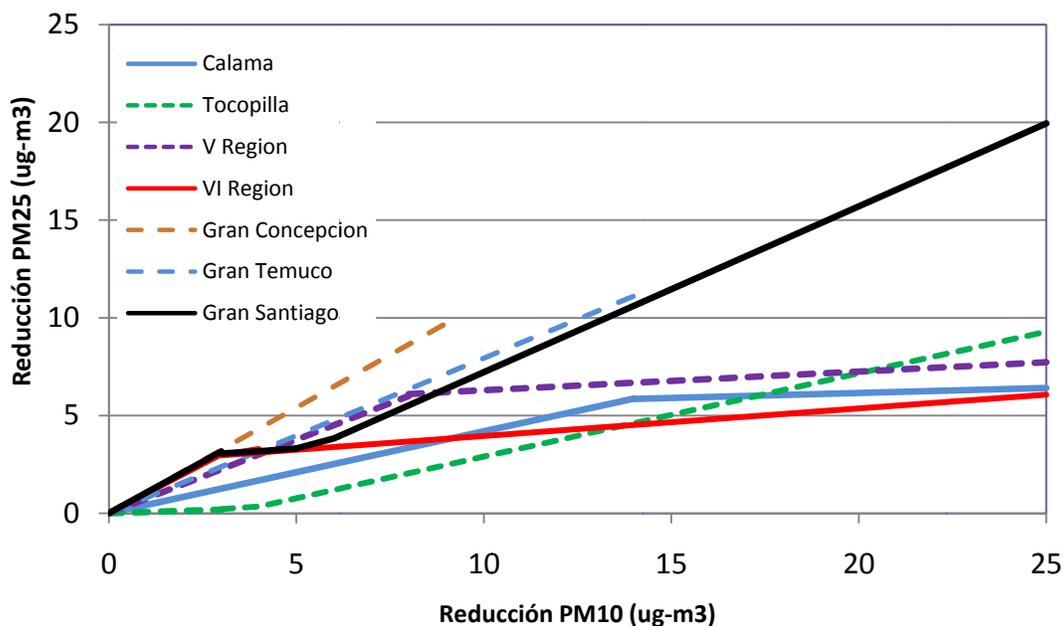
El método seguido para la estimación de costos y beneficios es el siguiente:

1. Se calcula la reducción requerida por la norma de PM<sub>10</sub> vigente (50 µg/m<sup>3</sup> y 120 µg/m<sup>3</sup>)
2. Se calculan los costos de reducción
3. Se calculan los beneficios de reducción, a partir de las reducciones ambientales concomitantes de PM<sub>2.5</sub>. Esta reducción se calcula según el itinerario de reducciones de emisiones a mínimo costo de PM<sub>10</sub> (aquí entra la información de mínimo costo para reducir PM<sub>10</sub> Figura 4-1).

Para la correcta estimación de las reducciones de PM<sub>10</sub> y de las reducciones de PM<sub>2.5</sub> asociadas a la norma de PM<sub>10</sub> se debe definir si es la norma anual o la diaria la que se encuentra activa en cada una de las ciudades consideradas en el análisis.

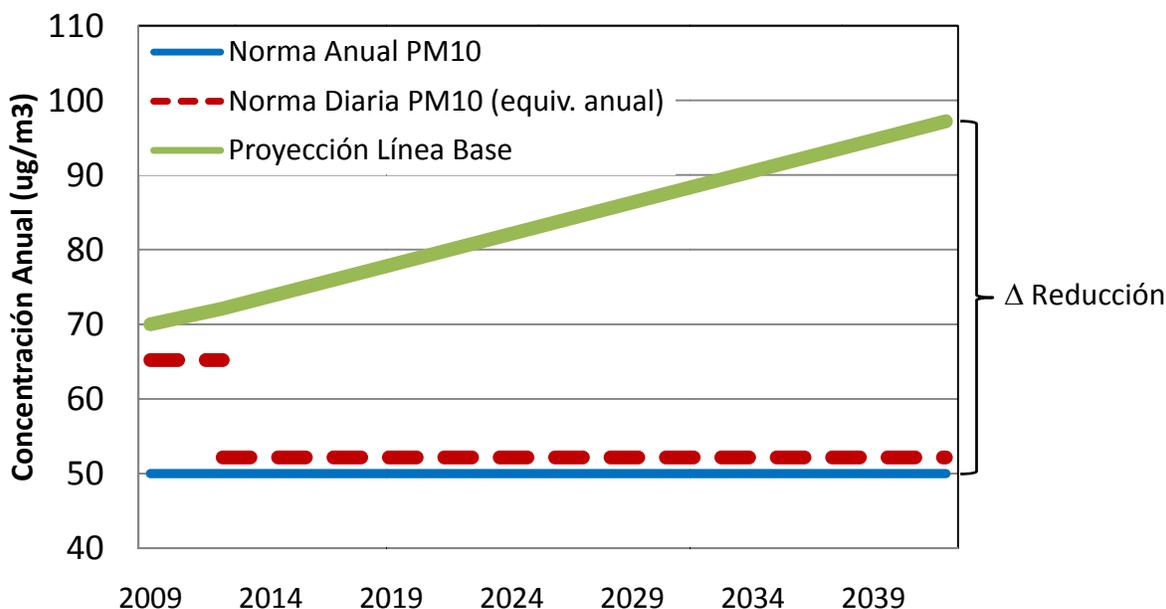
A modo de ejemplo, en la Figura 4-2 se muestra el caso de Santiago. Aquí se ilustra cómo el aumento en la exigencia de la norma diaria de PM<sub>10</sub>, no implica reducciones adicionales en las concentraciones en el largo plazo. Si tomamos en cuenta que la relación existente entre la media anual y el percentil 98 de las concentraciones diarias de PM<sub>10</sub> es de **2.3 veces** (DICTUC, 2008), la norma diaria de PM<sub>10</sub> tendría un equivalente anual de 65 µg/m<sup>3</sup>, si la norma diaria es de 150 µg-m<sup>3</sup> y de 52 µg/m<sup>3</sup>, si la norma diaria es de 120 µg/m<sup>3</sup> en el 2012, por lo que será mayor al nivel exigido por la norma anual vigente (50 µg/m<sup>3</sup>), lo que conlleva a que siempre será esta última la norma activa.

Figura 4-1: Curvas de reducción concomitante de PM<sub>2.5</sub> obtenidas por la norma de PM<sub>10</sub>.



Fuente: Elaboración propia

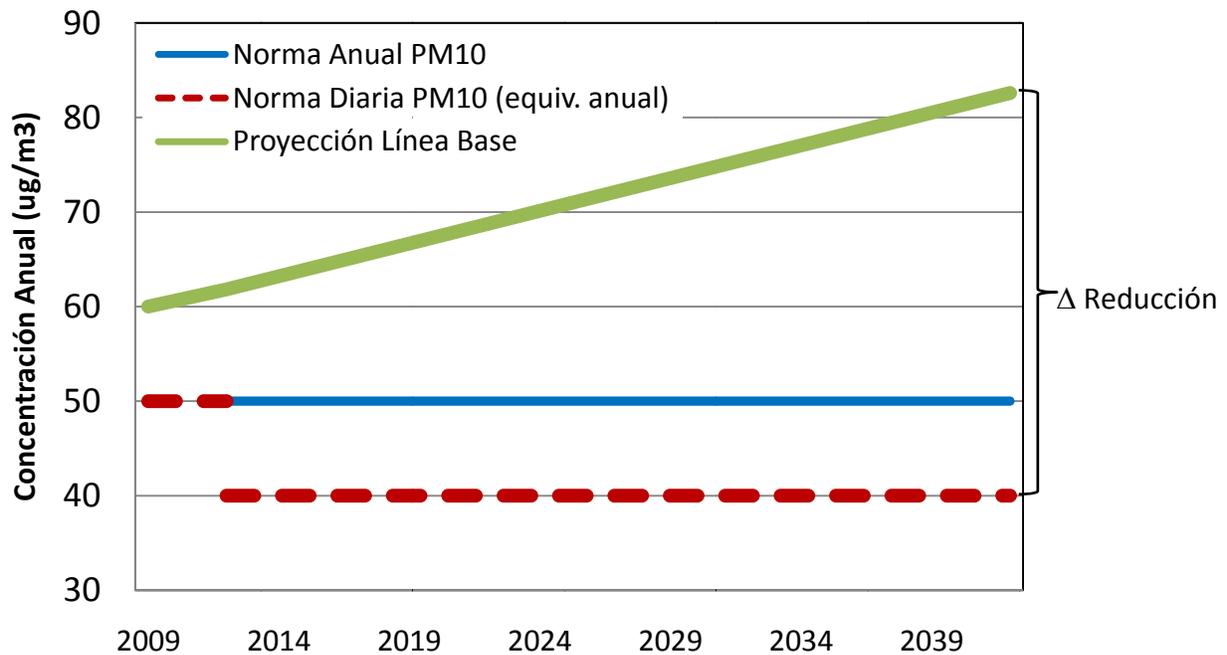
Figura 4-2: Esquema de cálculo de reducciones de concentraciones requeridas caso base para Santiago



Fuente: Elaboración Propia

Sin embargo, si consideramos el caso de Rancagua la relación existente entre la media anual y el percentil 98 de las concentraciones diarias de PM<sub>10</sub> es de **3.4 veces** (DICTUC, 2008), la norma diaria de 120 µg/m<sup>3</sup> en su equivalente anual sería más exigente que la norma anual vigente (50 µg/m<sup>3</sup>), tal como se muestra en la figura a continuación.

Figura 4-3: Esquema de cálculo de reducciones de concentraciones requeridas para el caso base para Rancagua



Fuente: Elaboración Propia

Nota: concentraciones sólo para ilustración. No corresponde a ninguna localidad en particular.

#### 4.2.1.2 Caso con Norma de PM<sub>2.5</sub>

En este caso las normas de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> están vigentes en forma simultánea. La norma de PM<sub>10</sub> mantiene sus niveles actuales (50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  anual, 150  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  diario). La norma de PM<sub>2.5</sub> tiene los valores definidos por las diferentes alternativas de norma propuestas.

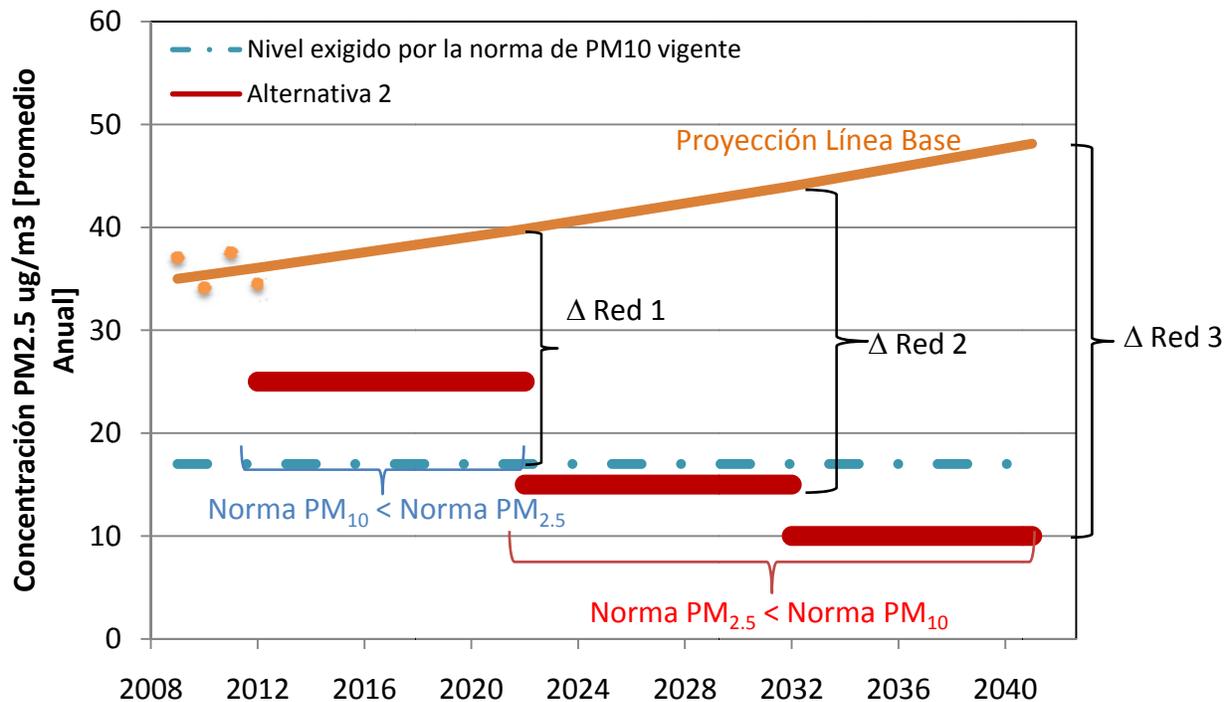
En este caso sólo una de las normas será activa (es decir, al cumplir una se cumple la otra con cierta holgura), pero cualquiera de las dos normas puede estar activa en algún momento del tiempo. En general, como la norma de PM<sub>2.5</sub> va reduciendo su valor, tenderá a estar activa más hacia el futuro, cuando sus valores sean menores. La Figura 4-4 ilustra la evolución de la reducción de concentración de PM<sub>2.5</sub>, al aplicarse la alternativa propuesta número 2 (ver sección 2.1).

De acuerdo con lo explicado en la sección 4.2.1.1, las medidas consideradas para cumplir con este límite impuesto por la norma de PM<sub>10</sub> implican reducciones concomitantes de PM<sub>2.5</sub> y sus precursores. En base a las curvas de mínimo costo estimadas para determinar la reducción de PM<sub>2.5</sub> obtenida por una reducción de PM<sub>10</sub> es posible determinar que, por ejemplo, en Santiago si la norma anual de PM<sub>10</sub> es de 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ; para cumplirla sería necesario reducir 20  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  de PM<sub>10</sub>, o bien un equivalente de 16  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  de PM<sub>2.5</sub> (ver Figura 4-1).

Tal como se aprecia en la Figura 4-4, para el caso de Santiago, la reducción de PM<sub>2.5</sub> obtenida por la norma de PM<sub>10</sub> ( $\Delta$  Red 1), es mayor que la exigida por la norma de PM<sub>2.5</sub> propuesta (25

$\mu\text{g}/\text{m}^3$  entre el 2012 y el 2021), por lo que sería la norma de  $\text{PM}_{10}$  la activa. Sin embargo, a partir de 2022, la norma  $\text{PM}_{2.5}$  exige una reducción mayor, por lo cual las reducciones alcanzadas desde dicho año deberían ser asociadas a la norma de  $\text{PM}_{2.5}$  y no a la de  $\text{PM}_{10}$  ( $\Delta$  Red 2 y  $\Delta$  Red 3).

Figura 4-4: Esquema de cálculo de reducciones de concentraciones requeridas para el caso con norma de  $\text{PM}_{2.5}$



Fuente: Elaboración Propia

Nota: concentraciones solo para ilustración. No corresponde a ninguna localidad en particular.

De acuerdo con esto, el método seguido para la estimación de costos y beneficios del cumplimiento de la norma de  $\text{PM}_{10}$  y  $\text{PM}_{2.5}$  en forma simultánea es el siguiente:

### Caso N1) Cumplimiento de norma de $\text{PM}_{10}$

Se calcula la reducción requerida por la norma de  $\text{PM}_{10}$ . Se calcula la reducción de  $\text{PM}_{2.5}$  asociada a esta norma obtenida según el itinerario de reducciones de emisiones a mínimo costo de  $\text{PM}_{10}$  (aquí entra la información de mínimo costo para reducir  $\text{PM}_{10}$ , ver Figura 4-1).

Se estudia qué ocurre con la norma de  $\text{PM}_{2.5}$ :

Si se cumple la norma de  $\text{PM}_{2.5}$ , entonces ésta es inactiva. Los costos y beneficios se calculan a partir de las reducciones requeridas por la norma de  $\text{PM}_{10}$ .

Si no se cumple la norma de  $\text{PM}_{2.5}$ , entonces la norma de  $\text{PM}_{10}$  será inactiva, y los costos y beneficios serán los del caso N2.

A continuación se presenta el problema de minimización que se requiere resolver:

$$\min \text{Costo} (\Delta E_j)$$

s.a.

$$\text{Conc}_{PM_{10}} \leq \text{Norma}_{PM_{10}}$$

$$\Delta E_j \geq 0$$

Donde:

$$\text{Costo}(\Delta E_j) = \sum_{\text{Emisión } j} \Delta E_j \quad : \text{ es el costo total de las reducciones de las emisiones del contaminante } j$$

$$\text{Conc}(PM_{10}) = \sum_{\text{Emisión } j} \left( \frac{E_j^0 - \Delta E_j}{FEC_j^{PM_{10}}} \right) \quad : \text{ es la concentración de PM}_{10} \text{ en función de las emisiones y reducciones de cada precursor } j.$$

$FEC_j^{PM_{10}}$ : Factor emisión – concentración de PM<sub>10</sub> del precursor j

$E_j^0$ : Emisión del precursor j

## Caso N2) Cumplimiento de la norma de PM<sub>2.5</sub>

*(El mismo proceso pero a la inversa)*

1. Se calcula la reducción requerida por la norma de PM<sub>2.5</sub>.
2. Se calcula la reducción de PM<sub>2.5</sub> asociada a la norma de PM<sub>10</sub> a partir de la relación obtenida según el itinerario de reducciones de emisiones a mínimo costo de PM<sub>2.5</sub> (aquí entra la información de mínimo costo para reducir PM<sub>2.5</sub> - Figura 4-1).
3. Se estudia qué ocurre con la norma de PM<sub>10</sub>:
  - a. Si se cumple la norma de PM<sub>10</sub>, entonces esta es inactiva. Los costos y beneficios se calculan a partir de la reducción requerida por la norma de PM<sub>2.5</sub>
  - b. Si no se cumple la norma de PM<sub>10</sub>, entonces la norma de PM<sub>2.5</sub> será inactiva, y los costos y beneficios serán los del caso N1.

A continuación se presenta el problema de minimización que se requiere resolver:

$$\min \text{Costo}(\Delta E_j)$$

s.a.

$$\text{Conc}_{PM_{10}} \leq \text{Norma}_{PM_{10}}$$

$$\text{Conc}_{PM_{2.5}} \leq \text{Norma}_{PM_{2.5}}$$

$$\Delta E_j \geq 0$$

Donde:

$Costo(\Delta E) = \sum_{emisionj} \Delta E_j$  : es el costo total de las reducciones de las emisiones del contaminante j

$Conc_{PM_{10}} = \sum_{emisionj} \left( \frac{E_j^0 - \Delta E_j}{FEC_j^{PM_{10}}} \right)$  : es la concentración de  $PM_{10}$  en función de las emisiones y reducciones de cada precursor j.

$Conc_{PM_{25}} = \sum_{emisionj} \left( \frac{E_j^0 - \Delta E_j}{FEC_j^{PM_{25}}} \right)$  : es la concentración de  $PM_{10}$  en función de las emisiones y reducciones de cada precursor j.

### Elección de caso N1 ó N2

Los casos N1 y N2 se calculan en forma independiente, ya que no depende uno del otro. Finalmente, hay que decidir cuál es el caso que representa la situación con la norma de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  vigentes.

Esta situación está representada por el caso que satisface ambas normas simultáneamente (recordar que ambas normas se deben cumplir). Ese es el caso que define las reducciones de emisiones requeridas, los costos y los beneficios:

- Caso N1: si cumple con ambas normas
- Caso N2: si cumple con ambas normas

En general, el caso elegido tiene los mayores costos de reducción. Esta es una manera simple de resolver el problema de minimización de costos del cumplimiento simultáneo de las dos normas.

### 4.2.2 Beneficios

En el estudio se consideró los beneficios en salud, visibilidad y materiales. Estos últimos dos sólo fueron incluidos para la ciudad de Santiago. Es importante destacar que estos valores no fueron actualizados en el estudio debido a la falta de disponibilidad de información.

Por otra parte, la implementación de una normativa para el material particulado fino tendría otros beneficios que no han sido cuantificados ni valorizados y que por lo tanto no están incluidos en el beneficio total de la norma. En la siguiente tabla se resumen los beneficios no considerados en el análisis.

Tabla 4-6 Beneficios no Cuantificados ni valorizados en el Estudio

Beneficio	Receptor Impactado	Descripción	Observaciones
<b>Visibilidad</b>	Paisaje	Aumento en la visibilidad, lo que además conlleva a beneficios estéticos asociados a un aumento del valor escénico de los entornos naturales y artificiales del País, una disminución en el riesgo de contraer accidentes automovilísticos y un estímulo al turismo, entre otros beneficios.	Beneficio sólo incluido para la ciudad de Santiago
<b>Materiales</b>	Construcciones	Alteración de los materiales de construcción y recubrimientos evitada en edificaciones expuestas a la contaminación (corrosión en superficies metálicas, suciedad sobre las fachadas por la sedimentación de las partículas )	Beneficio sólo incluido para la ciudad de Santiago
<b>Agricultura</b>	Cultivos	Aumento de la productividad en la agricultura por disminución de SO <sub>2</sub> , precursor de PM <sub>2.5</sub>	
<b>Biodiversidad</b>	Flora y Fauna	Protección Biodiversidad	
	Ecosistemas	Protección de Ecosistemas por disminución de deposición seca y/o húmeda	
	Suelo y Cuerpos de Agua	Protección de los suelos y aguas superficiales de la acidificación y eutrofización.	

Fuente: AGIES PPDA 2008, WBG. (1998) Pollution Prevention and Abatement Handbook 1998: toward cleaner, Laurenzi Tabasso M. y Marabelli M. (1992)

El beneficio social de la norma de PM<sub>2.5</sub> corresponde a las reducciones en concentraciones producidas por la nueva norma con respecto a la norma de PM<sub>2.5</sub> implícita de la actual norma de PM<sub>10</sub> en Chile<sup>13</sup>. Los beneficios sociales de las reducciones en concentración de PM<sub>2.5</sub> requeridas por las alternativas de norma fueron estimadas multiplicando los beneficios unitarios por µg/m<sup>3</sup> de PM<sub>2.5</sub> reducido recopilados por Cifuentes et al. (2005) y actualizados por Dictuc (2009) por las reducciones requeridas.

Se analizaron dos escenarios de valoración: Alto y Bajo, ambos se muestran en la Tabla 4-7. El escenario bajo considera mortalidad cardiopulmonar y un valor conservador de la reducción de riesgo. En cambio el escenario alto considera mortalidad por todas las causas, y un valor medio de la disposición a pagar por reducciones de riesgo de muerte.

<sup>13</sup> Debido a que el PM<sub>2.5</sub> corresponde a una parte del PM<sub>10</sub>, de acuerdo a una cierta proporción que depende del tipo de fuente emisora presente en cada ciudad, una norma de PM<sub>10</sub> indirectamente norma a una parte del PM<sub>2.5</sub>, lo que correspondería a una norma implícita para el PM<sub>2.5</sub> de la actual norma de PM<sub>10</sub>.

Tabla 4-7: Beneficios unitarios estimados para 2009 (US\$/Persona\*  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  PM2.5)

Escenario	Valor (US\$/persona * $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
Bajo	7
Alto	33

Fuente: Dictuc (2008)

Multiplicando estos valores por la reducción en concentraciones y la población respectiva a cada ciudad expuesta se obtienen los beneficios sociales de aplicar la nueva normativa. Estos valores se deben proyectar en el tiempo para representar el período de evaluación, considerando el aumento la población y del ingreso per cápita.

Para mayor detalle con respecto a la metodología de estimación de beneficios ver Anexo VIII.

### 4.2.3 Costos

La estimación de costo se realizó a nivel de fuentes detalladas en inventarios de emisiones, utilizando como fuente de medidas para reducción de emisiones: los AGIES<sup>14</sup> de planes de descontaminación de la Región Metropolitana, Temuco, Tocopilla y Calama y que cuenta con 17 medidas para fuentes móviles, 10 medidas para fuentes fijas y 2 medidas para fuentes fugitivas y *Air Control Net Documentation Report* (costo-efectividad para PM10, PM<sub>2.5</sub>, NO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub>, SO<sub>x</sub>) desarrollado para US-EPA para el análisis de regulación en calidad del aire en Mayo 2006, considerando aquellas medidas que eran aplicables a la realidad chilena. (53 medidas para Fuentes fijas).

En las ciudades con inventarios de emisiones disponibles, se utilizaron las medidas contenidas en los AGIES locales complementadas con medidas EPA, para obtener la curva de costos. En las ciudades sin inventarios de emisiones disponibles, se realizó una asignación directa de curvas de costos de otras ciudades o zonas similares.

En la Tabla 4-8 se resume los inventarios de emisiones entregados por CONAMA al consultor y utilizados para este estudio.

<sup>14</sup> AGIES entregados por CONAMA al consultor

Tabla 4-8: Inventarios de emisiones ocupados en el estudio.

Zona	Tipos de Fuente	Fuente	Año Inventario
Tocopilla	FF, FM, FFug	DICTUC 2006	2005
Calama	FF, FM, FFug	DICTUC 2008	2006
Ventanas	FF, FM, FFug	DICTUC 2008	2006
V Región	FF, FM	CENMA 2001	2000
VI Región	FF, FM	DICTUC (2007), SECTRA_PACIN III (2006)	2010
Gran Temuco	FF, FM, FFug	DICTUC (2008)	2010
Gran Concepción	FF, FM	DICTUC (2007), SECTRA PACIN III (2006)	2005, 2000
Gran Santiago	FF, FM, FFug	DICTUC (2007)	2005

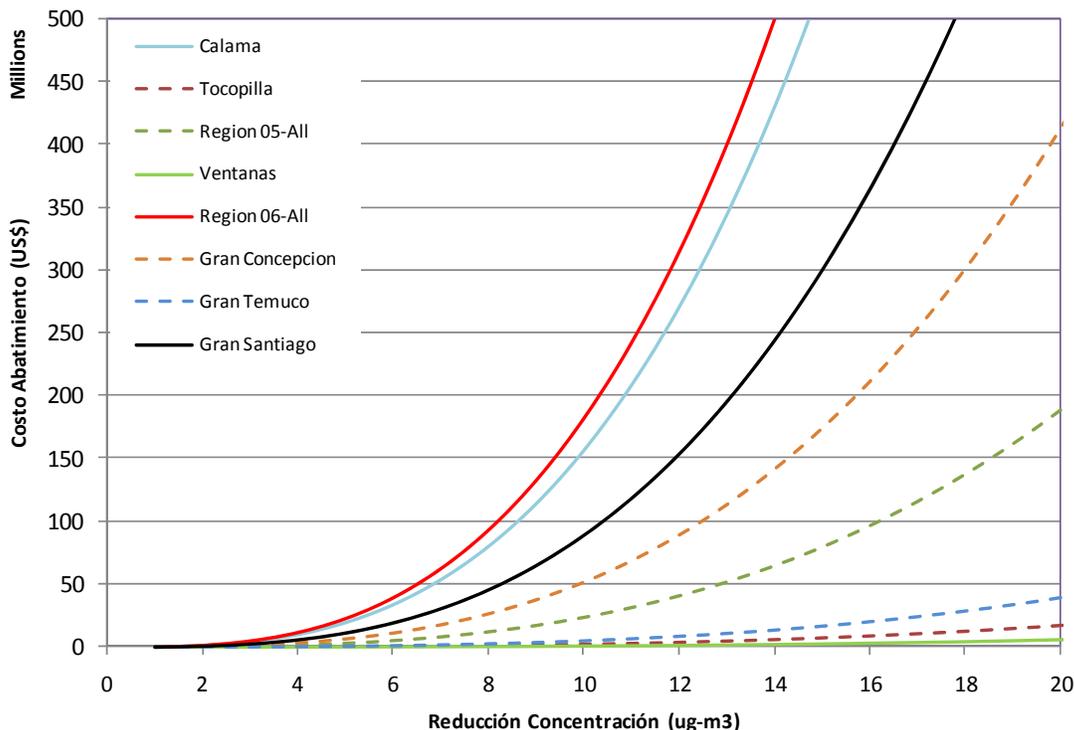
Fuente: Elaboración propia.

Para estimar la concentración de  $PM_{2.5}$  a partir de las medidas para reducción de emisiones, se utilizaron factores de emisión concentración (FEC). Los valores de FEC han sido detallados en la Tabla 0-46.

Para estimar los costos sociales de alcanzar la nueva norma se construyeron curvas de costo total por  $\mu g/m^3$  de  $PM_{2.5}$  reducido, integrando las curvas de costos medios obtenidas a partir de las medidas asignadas por fuente para las ciudades con información. Esta curva indica la máxima reducción posible por ciudad a partir de las medidas consideradas. En la

Figura 4-5 y Figura 4-6 se muestra de manera gráfica los costos totales mínimos para cada nivel de reducción de  $PM_{2.5}$  y  $PM_{10}$  respectivamente.. Para las ciudades sin información de costo una curva de las estimadas para ciudades con características similares. En el Anexo IX se encuentra el detalle de la metodología empleada.

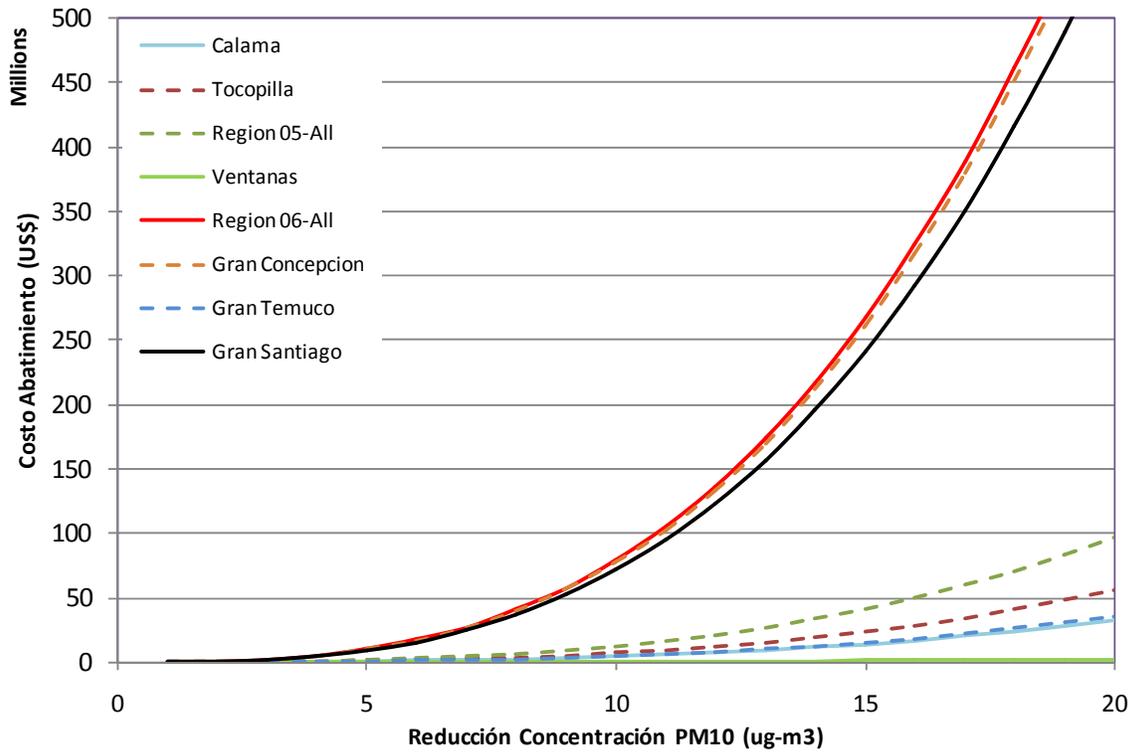
Figura 4-5: Curva de Costos totales de reducción de  $PM_{2.5}$  para ciudades con información, año 2012



Fuente: Elaboración propia.

Adicionalmente se estimó curvas de reducción de PM<sub>10</sub> siguiendo la misma metodología descrita anteriormente. La siguiente figura presenta las curvas obtenidas.

Figura 4-6: Curva de Costos totales de reducción de PM<sub>10</sub> para ciudades con información, año 2012



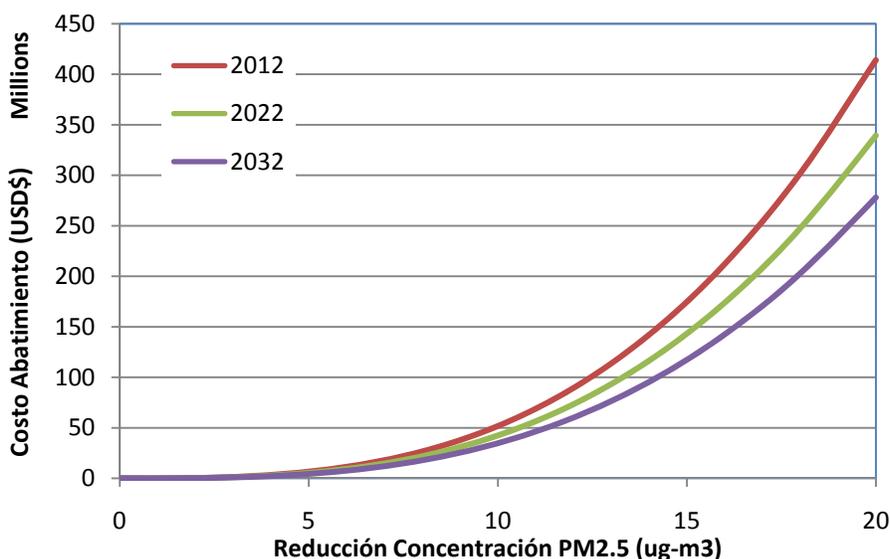
Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, se consideró que los costos disminuirán en el tiempo debido a dos efectos: (Rubin et al. 2004).

- Mejoras tecnológicas. Se asume que se produce una disminución de los costos a un ritmo anual del 1%.
- Mejoras en efectividad. Se asume que la eficacia de reducción de las concentraciones de PM<sub>2.5</sub> en un 1% anual.

En la Figura 4-7 se muestra la variación de la curva de costo de reducción de PM<sub>2.5</sub> a través del tiempo del Gran Concepción.

Figura 4-7: Costo Total para Gran Concepción en el tiempo



Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2.3.1 Costos de Monitoreo

Se consideró en el análisis el costo de monitores adicionales requeridos en Chile para el monitoreo de material particulado, de acuerdo a lo normado por la Directiva de la Unión Europea (2008). En la siguiente tabla se resume el número de monitores adicionales requeridos a nivel Nacional.

Tabla 4-9 Número de Monitores requeridos a Nivel Nacional

Zona	Número de Monitores
Norte	7
Centro	10
Sur	5
<b>Total</b>	<b>22</b>

Fuente: Elaboración propia a partir de Directiva 2008/50/EC del Parlamento Europeo y del Consejo “Ambient Air Quality and Cleaner Air for Europe”, Fuentes Difusas, 21 Mayo 2008 y SINCA

Los costos considerados corresponden al costo del monitor (20.000 USD) y los costos anuales de mantención y operación (15.625 USD).

El valor presente de los costos de monitoreo (inversión, mantención y operación) asciende a 4.240.000 dólares para todo el período de evaluación.

#### 4.2.3.2 Costos de declaración zona saturada

En el análisis se incluyó el costo asociado a la declaración de zona saturada, que implica la implementación de las diferentes alternativas de norma de  $PM_{2.5}$  analizadas, de acuerdo con información aportada por la contraparte el costo de declaración de zona saturada incluyendo los estudios requeridos (modelación atmosférica, inventarios de emisiones, campañas de monitoreo, personal e infraestructura requerida, entre otros) fluctúa entre 300.000 y 480.000 USD por ciudad.

A continuación se presenta el número de ciudades que se verán afectadas por este proceso y los costos en valor presente por alternativa evaluada.

Tabla 4-10 Número de ciudades declaradas como zona saturada por alternativa evaluada

Alternativa	2012	2022	2032
Base	16		
Alternativa 1	20	4	3
Alternativa 2	15	9	3
Alternativa 3	15	5	7
Alternativa 4	15	5	4

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar de la tabla anterior la implementación de la norma para  $PM_{2.5}$  implicaría, en el primer período de implementación, la declaración de 20 ciudades como zonas saturadas si se considera la alternativa 1, lo que corresponde a un número 25% mayor a lo que ocurriría en el caso en que esta norma no fuera implementada, por la norma vigente de  $PM_{10}$ . Para el caso de las alternativas 2, 3 y 4, el número de zonas declaradas como saturadas para este mismo período de implementación sería aproximadamente un 6% menor con respecto a la situación base.

Para los períodos siguientes, el número de ciudades saturadas por material particulado fino es siempre menor a la alternativa base, siendo esta diferencia mayores al 40%.

Tabla 4-11 Costos Declaración Zona Saturada para las ciudades afectadas por la implementación de la norma de PM<sub>2.5</sub> (MUSD)

Alternativa	Costos Declaración Zona Saturada
Base	<b>5.0</b> (4.0 – 5.9)
Alternativa 1	<b>7.0</b> (5.6 – 8.3)
Alternativa 2	<b>6.1</b> (4.9 – 7.3)
Alternativa 3	<b>5.8</b> (4.7 – 7.0)
Alternativa 4	<b>5.6</b> (4.5 – 6.7)

Fuente: Elaboración propia a partir de datos entregados por la contraparte

## 5. Norma Diaria de Material Particulado Fino

En octubre de 2006, la EPA revisó las normas de calidad del aire para PM<sub>2.5</sub> estableciendo un nivel de norma diaria más estricta con el objetivo específico de proteger la salud de la población contra los efectos asociados a la exposición del material particulado fino a corto plazo. El nivel de norma se actualizó de 65 a 35 (µg/m<sup>3</sup>), sustentado en la gran cantidad de evidencia significativa de estudios de exposición a corto plazo de PM<sub>2.5</sub> realizados en Estados Unidos, que relacionan la exposición a corto plazo del material particulado fino con efectos graves a la salud como mortalidad prematura, aumento de enfermedades respiratorias y cardiovasculares, aumento de los ingresos hospitalarios y visitas a salas de emergencia.

Al establecer un nivel diario de 35 (µg/m<sup>3</sup>), la normativa de EEUU consideró que este estándar protegería la salud de la población con un margen adecuado de seguridad frente a los efectos graves asociados a la exposición a PM<sub>2.5</sub> a corto plazo, es decir, considerando un criterio de riesgo.

Por otra parte la OMS establece un nivel guía para los niveles de concentraciones diarias de PM<sub>2.5</sub> igual a 25 µg/m<sup>3</sup>, el cual debe ser alcanzado a través de objetivos intermedios que permitan, de manera gradual, llegar a este valor recomendado.

En la Tabla 5-1 se presentan los valores objetivos para los niveles de concentración diaria de PM<sub>2.5</sub> recomendados por este organismo.

Tabla 5-1 Niveles de Concentración Diaria de PM<sub>2.5</sub> recomendada por la OMS

Concentraciones de 24 hrs	PM10	PM2.5	Fundamento del Nivel Elegido
Objetivo intermedio-1 (OI-1)	150	75	Basado en coeficientes de riesgo publicados en estudios multicéntricos y meta-análisis (incremento de alrededor del 5% de la mortalidad a corto plazo sobre el valor de las GCA).
Objetivo intermedio-2 (OI-2)	100	50	Basado en coeficientes de riesgo publicados en estudios multicéntricos y meta-análisis (incremento de alrededor del 2,5% de la mortalidad a corto plazo sobre el valor de las GCA).
Objetivo intermedio-3 (OI-3)***	75	37,5	Basado en coeficientes de riesgo publicados en estudios multicéntricos y meta-análisis (incremento de alrededor del 1,2% de la mortalidad a corto plazo sobre el valor de las GCA).
Guía de calidad del aire (GCA)	50	25	Basado en la relación entre los niveles de MP de 24 horas y anuales.

**Nota:** El porcentaje de incremento en el riesgo es sobre el valor de las guías de calidad del aire GCA (último valor en la tabla).

Fuente: “Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre Actualización mundial 2005” World Health Organization (2005) .

Como se explicó anteriormente, en el presente estudio se analizaron diferentes alternativas de norma diaria (ver sección 2.1.1). Para cada una de las alternativas consideradas se estudió el número de días de superación de norma que se debería enfrentar en el caso que una norma diaria de PM<sub>2.5</sub> fuera implementada hoy en Chile, considerando dos escenarios, uno en el cual no ha sido implementada una norma anual para la fracción fina y otro escenario en el que una norma anual de PM<sub>2.5</sub> ya haya sido implementada. El número de días con episodios fueron calculados a partir de los datos de monitoreo entregados al consultor para Calama, Gran Santiago, Gran Valparaíso, Gran Concepción y Talca.

Es importante destacar que los valores de la fila celeste en la tabla corresponden a distintos niveles de norma diaria de PM<sub>2.5</sub> analizados para la situación anteriormente descrita.

Tabla 5-2 Número de días superación de norma sin norma anual de PM<sub>2.5</sub> para áreas metropolitanas de Chile que cuentan con datos de monitoreo.

Zona	Area Met	Year	AA	P98	Norma Diaria PM <sub>2.5</sub> (ug/m <sup>3</sup> )							
					40	50	60	70	50	63	75	88
Norte*	Calama	2007	11	37	1	0	0	0	0	0	0	0
		2004	36	92	135	92	64	41	92	58	34	18
	Gran Santiago	2005	33	80	118	72	48	25	72	44	18	5
		2006	35	90	144	89	66	41	89	56	28	14
Centro	Gran Valparaiso	2005	21	84	36	24	11	6	24	10	5	1
		2006	22	88	45	32	23	10	32	22	8	2
		2007	19	48	7	0	0	0	0	0	0	0
		2008	23	61	3	1	0	0	1	0	0	0
Sur	Gran Concepcion	2005	23	79	48	27	14	7	27	11	6	1
		2006	24	98	63	43	28	11	43	26	9	4
		2007	27	95	57	36	22	18	36	21	12	6
		2008	35	71	59	40	23	11	40	19	10	8
	Talca	2005	47	285	83	48	30	24	48	27	21	17
		2006	34	204	54	45	37	32	45	36	30	19
		2007	42	209	60	55	47	38	55	44	36	25
		2008	44	184	52	43	39	37	43	38	33	30

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de monitoreo CONAMA (2008)

Para el cálculo de los días con episodios se consideró como un día de episodio aquel en que uno o más monitores por área se encontraban sobre el límite de norma para un mismo día.

Si se implementara hoy en Santiago una norma diaria de 63 µg/m<sup>3</sup> para PM<sub>2.5</sub>, equivalente a 2.5 veces el nivel anual propuesto para las alternativas 2, 3 y 4 evaluadas (25 µg/m<sup>3</sup>), se tendrían cerca de 50 días de superación de norma, considerando el promedio de los años 2004, 2005 y 2006. En el caso de Talca los días de episodios disminuyen a 35, para el mismo nivel de norma.

Estos resultados se obtienen para una situación en que aún no se ha implementado una normativa para el material particulado fino.

En la Tabla 5-3 y Tabla 5-4 se presenta el número de días sobre norma en el caso en que una norma anual de 25 µg/m<sup>3</sup> y 20 µg/m<sup>3</sup> para PM<sub>2.5</sub> es implementada, para distintos valores de norma diaria de PM<sub>2.5</sub>. Para calcular el número de episodios se simuló las concentraciones de PM<sub>2.5</sub> que se tendrían una vez implementada la norma anual y se utilizó el percentil 98 como criterio de excedencia de la norma.

Tabla 5-3 Número de días superación de norma para monitores de Chile con norma anual de PM<sub>2.5</sub> de 25 µg/m<sup>3</sup>

Zona	Area Met	Monitor	Norma Diaria PM2.5 (ug/m3)			
			50	63	75	88
Centro	Gran Santiago	EML-COS8	12	3	1	0
		EMN-COS8	16	5	2	1
		EMO-COS8	19	7	3	1
Sur	Gran Temuco	Centro	5	1	0	0
		Las Encinas	32	16	9	5
		OTR	11	3	1	0
	Gran Concepción	San Vicente 2	24	10	5	2
		Libertad	18	6	2	1
	Talca	La Florida	36	20	12	7
		Universidad de Talca	30	15	8	4

Fuente: Elaboración propia

 Tabla 5-4 Número de días superación de norma para monitores de Chile con norma anual de PM<sub>2.5</sub> de 20 µg/m<sup>3</sup>

Zona	Area Met	Monitor	Norma Diaria PM2.5 (ug/m3)			
			40	50	60	70
Centro	Gran Santiago	EML-COS8	12	3	1	0
		EMN-COS8	17	6	2	1
		EMO-COS8	19	7	3	1
Sur	Gran Temuco	Centro	5	1	0	0
		Las Encinas	33	18	10	6
		OTR	11	3	1	0
	Gran Concepción	San Vicente 2	25	11	5	2
		Libertad	18	6	2	1
	Talca	La Florida	35	20	12	7
		Universidad de Talca	30	15	8	4

Fuente: Elaboración propia

En este caso el número de días con superación de norma disminuye en comparación a la situación sin normativa implementada para el PM<sub>2.5</sub> debido a que, una vez implementada la norma, la distribución de las concentraciones se desplaza, lo que significa que el percentil 98 y la media disminuyen.

Para Talca, con una norma anual de PM<sub>2.5</sub> igual a 25 µg/m<sup>3</sup> y con una norma diaria de 75 µg/m<sup>3</sup> los días con sobre norma disminuyen a 12 aproximadamente.

## 5.1 Gestión de Episodios Críticos

La gestión de episodios críticos (GEC) tiene como objetivo evitar niveles de riesgo considerados como inaceptables por la sociedad. De acuerdo con esto se propone definir los límites diarios para la GEC basados en niveles que mantengan los niveles de riesgo diario aceptados implícitamente en los límites establecidos en la norma PM<sub>10</sub> vigente. A continuación se presenta los límites para gestión de episodios críticos generados en base a los límites de GEC de PM<sub>10</sub> utilizados en Chile para diferentes alternativas de norma diaria de PM<sub>2.5</sub>, suponiendo una razón entre la fracción fina y gruesa igual a 0.5.

Tabla 5-5 Límites para gestión de episodios críticos en base a propuesta OMS

Episodio	ICAP	PM10 (ug/m3)	PM2.5 (ug/m3)					
			75	65	60	50	40	37.5
Norma 24hr	100	150	75	65	60	50	40	37.5
<b>Alerta</b>	200	195	98	85	78	65	52	49
<b>Preemergencia</b>	300	240	120	104	96	80	64	60
	400	285	143	124	114	95	76	71
<b>Emergencia</b>	500	330	165	143	132	110	88	83

Fuente: Elaboración propia a partir de ICAP para PM10 y recomendaciones OMS

## 6. Resultados

A continuación se presentan los resultados obtenidos del análisis.

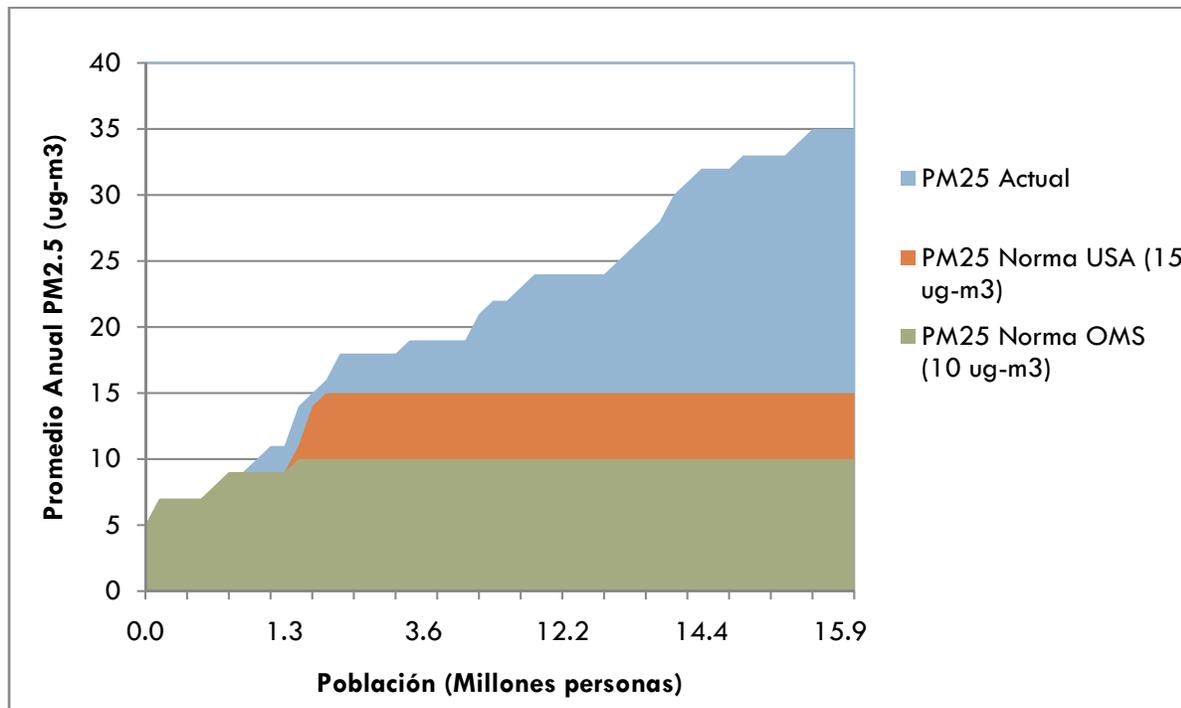
### 6.1 Reducción de Concentraciones

La reducción de concentraciones requerida por las distintas alternativas de norma para las ciudades analizadas se presenta en detalle en el Anexo XIV.

### 6.2 Exposición y Casos Evitados

En la Figura 6-1 se presenta la actual exposición de la población chilena a concentraciones de PM<sub>2.5</sub>. Más de 10 millones de habitantes están expuestos a concentraciones mayores a 15 (µg/m<sup>3</sup>), valor que corresponde a la norma anual vigente en EE.UU. Si se compara la población expuesta a niveles superiores al recomendado por la OMS de 10 (µg/m<sup>3</sup>), la situación se torna aún más crítica.

Figura 6-1: Exposición de la Población Chilena a PM<sub>2.5</sub>



Fuente: Elaboración Propia a partir de datos de monitoreo entregados por CONAMA (2008)

La figura presentada anteriormente muestra como gran parte de la población se encuentra expuesta a niveles considerados peligrosos para la salud, lo que se traduce en muertes y enfermedades adicionales.

En la siguiente tabla se presentan los casos totales evitados durante el período de análisis (2012-2041) para cada alternativa de norma propuesta y el costo de implementación de cada una de ellas (percentil 50). Como se aprecia en la tabla la Alternativa 1 evitaría el mayor número de muertes al mayor costo.

Tabla 6-1: Casos Totales Evitados en el Período 2012-2041 (Miles de casos) y costos por alternativa de norma (Millones de USD)

Efecto	Norma Base PM10	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
Mortalidad Prematura (valor alto)	122	161	157	148	128
Admisiones Hospitalarias	197	268	260	244	209
Visitas Sala Emergencia Niños	821	1,070	1,040	992	858
Días Laborales Perdidos	49,200	63,800	62,400	59,400	51,400
Días con alguna restricción de actividad	234,000	304,000	297,000	283,000	245,000
<b>Valor Presente Costos (M USD)</b>	<b>11,300</b>	<b>23,600</b>	<b>20,000</b>	<b>15,600</b>	<b>11,200</b>

Fuente: Elaboración Propia

Adicionalmente a los casos evitados, la implementación de las distintas alternativas de norma implicarían un aumento en la esperanza de vida de toda la población como consecuencia de la reducción de de concentraciones de PM<sub>2.5</sub>, situación que es posible ver en la Tabla 6-2.

Tabla 6-2: Aumento Promedio de Esperanza de Vida considerando un promedio de vida de 80 años (meses)

Norma	2012	2022	2032
Base PM10	7.4	7.4	7.4
Alternativa 1	11.0	11.8	12.3
Alternativa 2	10.7	11.8	12.3
Alternativa 3	10.3	11.5	12.3
Alternativa 4	7.8	8.5	8.9

Fuente: Elaboración Propia

De la tabla anterior, se aprecia que en el primer período analizado (2012), la alternativa 1 es la que presenta el mayor aumento promedio de esperanza de vida. Se puede observar también que las alternativas 1 y 2 tendrían el mismo aumento promedio de esperanza de vida para los dos últimos períodos de análisis (2022 y 2032) ya que exigen el mismo nivel de reducción.

### 6.3 Incertidumbre de costos y beneficios

Para estimar la incertidumbre asociada a posibles rangos máximos y mínimos de costos y beneficios se procedió de la siguiente manera:

1. Según información disponible de Air Control Net, EPA (2006) los costos de cada medida pueden fluctuar entre 0.5 y 2 veces el costo medio propuesto. En base a las recomendaciones de Morgan y Henrion (1990), la incertidumbre asociada a costos puede ser representada como una distribución triangular con límites inferior, medio y superior según los valores estimados en base a EPA (2006) (0.5, 1, 2 veces los costos medios estimados)<sup>15</sup>.
2. A su vez, siguiendo las recomendaciones de Morgan y Henrion (1990) se asumió una distribución uniforme para los beneficios estimados, con límites inferior y superior los niveles de beneficios bajo y alto definidos en la sección 4.2.2, respectivamente<sup>16</sup>.
3. Se procedió a propagar incertidumbre en el modelo mediante el método de simulación de Montecarlo usando el software Analytica 4.0 (Morgan y Henrion, 1990)<sup>17</sup>.

La distribución triangular de los costos, para cada una de las alternativas evaluadas se presenta de manera gráfica en la siguiente figura.

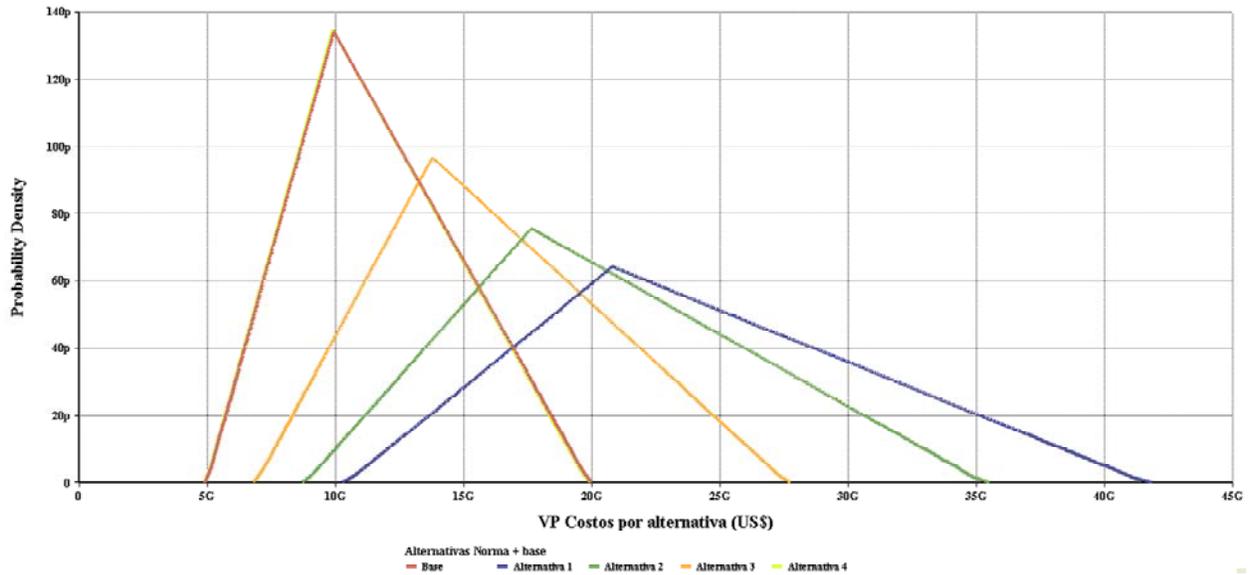
---

<sup>15</sup> Morgan y Henrion (1990) recomiendan, que cuando no se dispone de información para poder inferir la distribución de probabilidad de una muestra y si se dispone de valores de medios y rangos mínimos y máximos; es razonable representar la variable analizada como una variable aleatoria distribuida triangular y caracterizada por los valores disponibles (media, mínimo y máximo).

<sup>16</sup> Morgan y Henrion (1990) recomiendan, que cuando no se dispone de información para poder inferir la distribución de probabilidad de una muestra y sólo se dispone de rangos mínimos y máximos; es razonable representar la variable analizada como una variable aleatoria distribuida uniforme en el rango de valores definidos.

<sup>17</sup> En un correcto análisis de incertidumbre se debe considerar la interacción entre diferentes distribuciones de probabilidad e integrar el aporte de cada variable aleatoria modelada para el cálculo del resultado objetivo. En este caso se considera la interacción entre una variable distribuida triangular (costos) con una uniforme (beneficios) para el cálculo del beneficio neto ([Beneficios] ~ uniforme – [Costos] ~ triangular). Se debe destacar que se suponen muestreos aleatorios independientes para la simulación de cada una de las variables aleatorias consideradas.

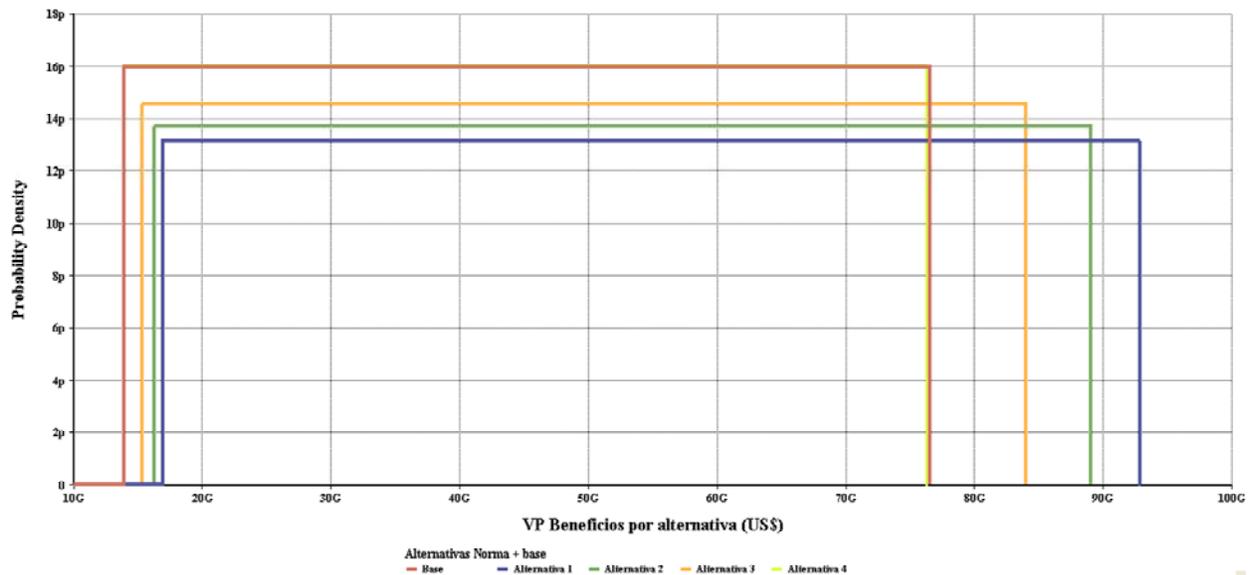
Figura 6-2 Distribución Triangular de Costos para cada alternativa de norma analizada



Fuente: Elaboración propia, imagen modelación Analytica 4.0

En el caso de los beneficios, la distribución considerada corresponde a una distribución uniforme, como se explicó anteriormente. A continuación se presenta la distribución de las distintas alternativas de norma analizadas en el Estudio.

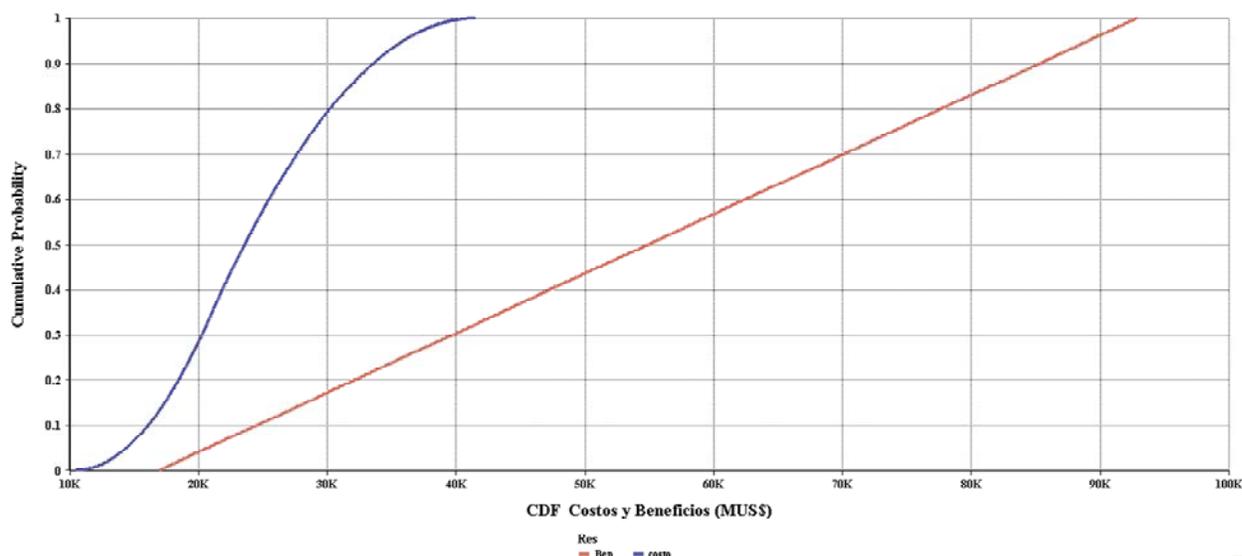
Figura 6-3 Distribución Uniforme de Beneficios para cada alternativa de norma analizada



Fuente: Elaboración propia, imagen modelación Analytica 4.0

Finalmente se presenta la distribución de probabilidad acumulada para los costos y los beneficios considerados en el análisis.

Figura 6-4 Distribución de Costos y Beneficios utilizada en el Estudio



Fuente: Elaboración propia, imagen modelación Analytica 4.0

## 6.4 Valor Presente de Costos y Beneficios

Se estimaron los costos y beneficios para cada una de las alternativas propuestas. En la Tabla 6-3, es posible apreciar el percentil 50<sup>18</sup> de la distribución de probabilidad acumulada del: valor presente de beneficios y valor presente de costos (para cada período de 10 años).

Tabla 6-3: Valor presente de los costos y beneficios (percentil 50) (MUS\$) por período

Alternativa Norma	Indicador	2012 - 2021	2022 - 2031	2032 - 2041	2012 - 2041
<b>Base</b>	VP Beneficios	21,000	14,400	9,900	<b>45,200</b>
	VP Costos	7,400	2,800	1,100	<b>11,300</b>
<b>Alternativa 1</b>	VP Beneficios	21,100	17,400	16,500	<b>54,900</b>
	VP Costos	8,700	7,700	7,300	<b>23,600</b>
<b>Alternativa 2</b>	VP Beneficios	18,800	17,400	16,500	<b>52,600</b>
	VP Costos	5,100	7,700	7,300	<b>20,000</b>
<b>Alternativa 3</b>	VP Beneficios	18,800	14,400	16,500	<b>49,700</b>
	VP Costos	5,100	3,300	7,300	<b>15,600</b>
<b>Alternativa 4</b>	VP Beneficios	18,800	14,400	11,900	<b>45,100</b>
	VP Costos	5,100	3,300	2,900	<b>11,200</b>

Nota: Valor Presente calculado para los distintos períodos, con una tasa de descuento de 8% anual. Tipo Cambio 640 CLP/USD.

Valores presentados con dos cifras significativas.

Fuente: Elaboración propia.

<sup>18</sup> El percentil 50 representa el valor bajo el cual se encuentran la mitad de los datos de la muestra, y en este caso representa la mediana del intervalo de confianza estimado.

De la tabla anterior se puede observar que las alternativas 1, 2 y 3 presentan beneficios mayores a los generados por la situación base (sólo norma de PM<sub>10</sub> vigente). La alternativa 1 es la que presenta mayores beneficios siendo estos 21% mayores a los beneficios asociados a la situación base. Las alternativas 2 y 3 tienen beneficios 16% y 10% mayores a la alternativa base respectivamente.

La alternativa 4 es la única alternativa que presenta beneficios similares a la alternativa base, sin diferencias significativas.

Adicionalmente se puede observar que los beneficios son siempre mayores a los costos para todas las alternativas evaluadas, considerando el percentil 50 de los resultados obtenidos.

Los costos de la implementación de la norma fluctúan entre [11,000 – 24,000] miles de millones de USD durante los 30 años en los que se evalúa el proyecto. La alternativa 4 presenta costos del mismo orden de magnitud de los costos que se deben incurrir para cumplir con el nivel exigido por la norma de PM<sub>10</sub> (120 µg/m<sup>3</sup> diario) en el caso que no entrara en vigencia una norma para el material particulado fino (situación base). La alternativa 1 es la que presenta mayores costos de implementación (2.1 veces los costos de la situación base). A su vez las alternativas 2 y 3 presentan costos 1.8 y 1.4 veces superiores a los costos de la situación base respectivamente.

Por otra parte se calculó el costo anual que implicaría la implementación de las distintas alternativas evaluadas. En la Tabla 6-4 se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 6-4: Costo de Reducción Anual (Millones de USD por año)

Alternativa Norma	2012-2021	2022-2031	2032-2041
<b>Base</b>	1100	400	200
<b>1</b>	1300	1100	1100
<b>2</b>	800	1100	1100
<b>3</b>	800	500	1100
<b>4</b>	800	500	400

Fuente: Elaboración Propia

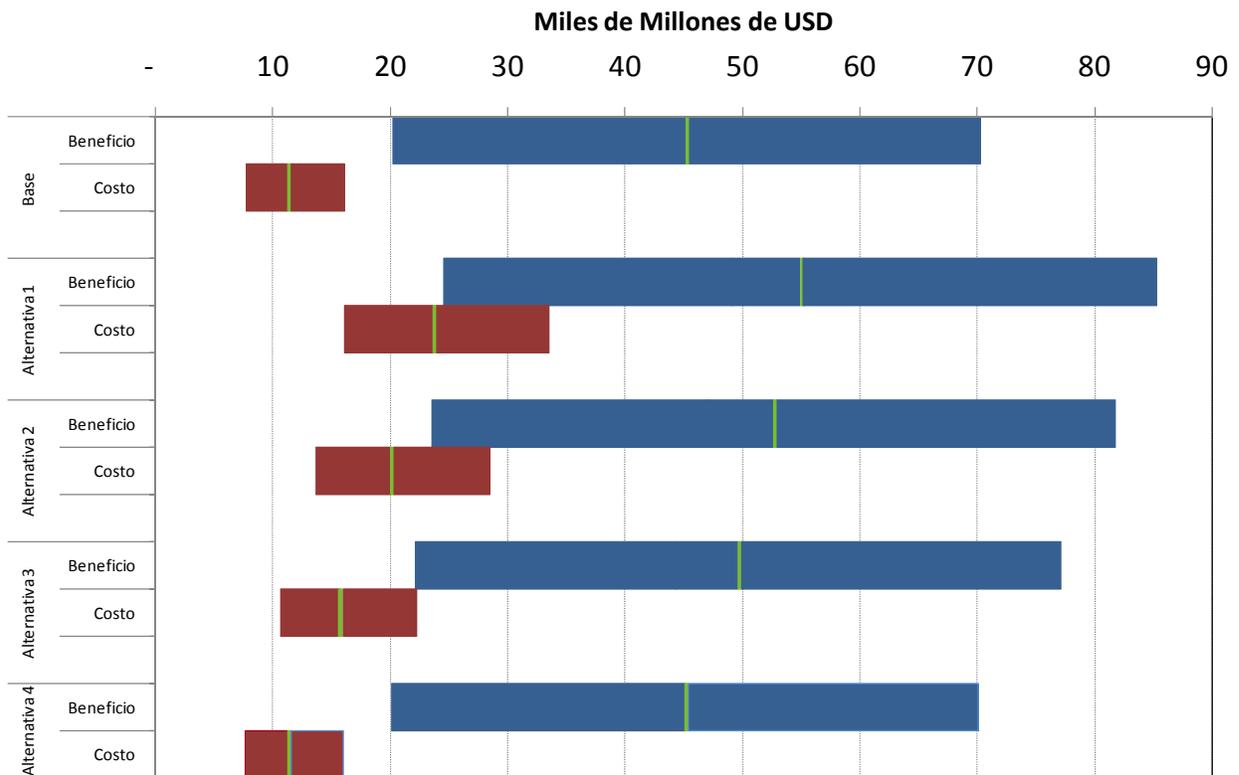
La implementación de la norma implicaría, en el caso de las alternativa 1 incurrir en un mayor costo los primeros diez años de implementación debido al nivel exigido para el primer período, disminuyendo en los períodos siguientes. Con respecto a las alternativas 2 y 3, a pesar de que llegan al mismo nivel de norma, la exigencia comienza antes en el caso de la alternativa 2, lo que se traduce en que hay que incurrir en un mayor costo en el segundo período (\$1.100 MUSD versus \$500 MUSD).

Adicionalmente, es posible apreciar que los costos de las alternativas 1 son un 18% mayor que los costos de la situación base para el primer período de evaluación (2012 – 2021). Para el caso de las 2, 3 y 4 los costos son un 27% menores que los costos de la situación base para el mismo período.

Con respecto al segundo período, las alternativas 1 y 2 presentan costos mayores a la situación base, aproximadamente 1.8 veces, mientras las alternativas 3 y 4 presentan costos un 25% superiores. Finalmente el último período de implementación sería el que presenta las mayores diferencias con respecto a la alternativa base, siendo los costos de las alternativas propuestas 4.5 veces mayores.

Los resultados anteriores sólo consideran el percentil 50 de la distribución de probabilidad estimada. En la decisión se debe considerar adicionalmente el rango en que fluctúan los costos y beneficios de cada una de las alternativas propuestas. En la Figura 6-5 se muestra el intervalo de confianza estimado para el valor presente total de costos y beneficios de cada alternativa analizada (en verde se muestra el percentil 50 de cada indicador).

Figura 6-5: Valor presente de los costos y beneficios (Miles de Millones MUS\$) por alternativa de norma analizada



Fuente: elaboración Propia

## 6.5 Valor Presente del Beneficio Neto

Todas las alternativas analizadas presentan un beneficio neto en órdenes de magnitud similares para el percentil 50 y percentil 90 de los resultados. En el límite superior del intervalo de

confianza considerado (percentil 90), la alternativa 1 (alternativa más estricta en los niveles exigidos alcanzando al final del período el nivel recomendado por la OMS,  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y la alternativa 2 son las que presenta el mayor beneficio social neto (61,700 MUSD). Sin embargo, la alternativa 1 tiene el menor beneficio neto en el límite inferior del intervalo de confianza (percentil 10), siendo de esta manera la alternativa que presenta los escenarios con mayores beneficios posibles pero a la vez la mayor incertidumbre en los resultados finales.

Por otra parte, las alternativas 3 y 4 son las que presentan los mayores beneficios netos para el percentil 50 de los resultados. Pero para el límite superior del intervalo de confianza considerado (percentil 99), la alternativa 3 es la que presenta beneficios sociales mayores en comparación a la alternativa 4 para el mismo límite.

En la Figura 6-7 se puede observar que la alternativa 1 presenta un beneficio neto negativo el 10% de los casos. Por otra parte, la alternativa 2 presenta en aproximadamente el 7% de los casos presenta un beneficio neto negativo. En el caso de la alternativa 3, existe una probabilidad del 3% de presentar un beneficio negativo. La alternativa que presenta la menor probabilidad de presentar un beneficio neto negativo corresponde a la alternativa 4, con menos de un 1% de los casos.

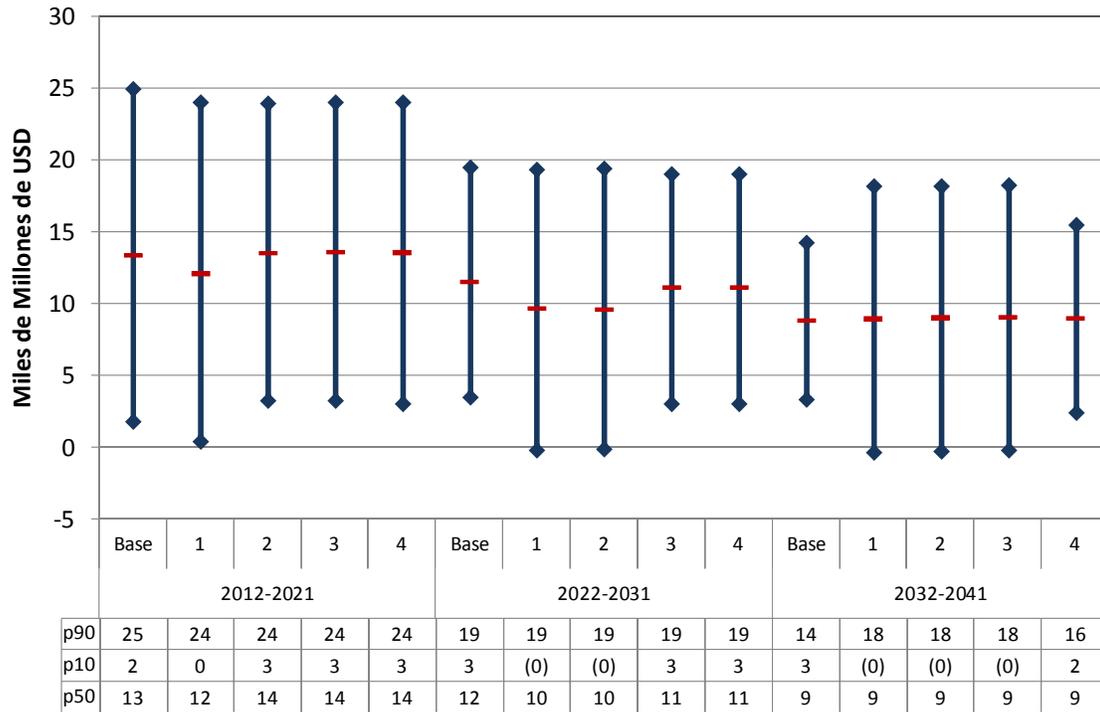
Tabla 6-5 Beneficio Neto por alternativa de norma analizada (MUSD)

Alternativa	Beneficio Neto	IC (90%)
Base	33,700	(8,570 – 58,700)
Alternativa 1	30,600	-(5 – 61,700)
Alternativa 2	32,000	(3,010 – 61,700)
Alternativa 3	33,500	(6,020 – 61,100)
Alternativa 4	33,500	(8,710 – 58,500)

Fuente: Elaboración Propia

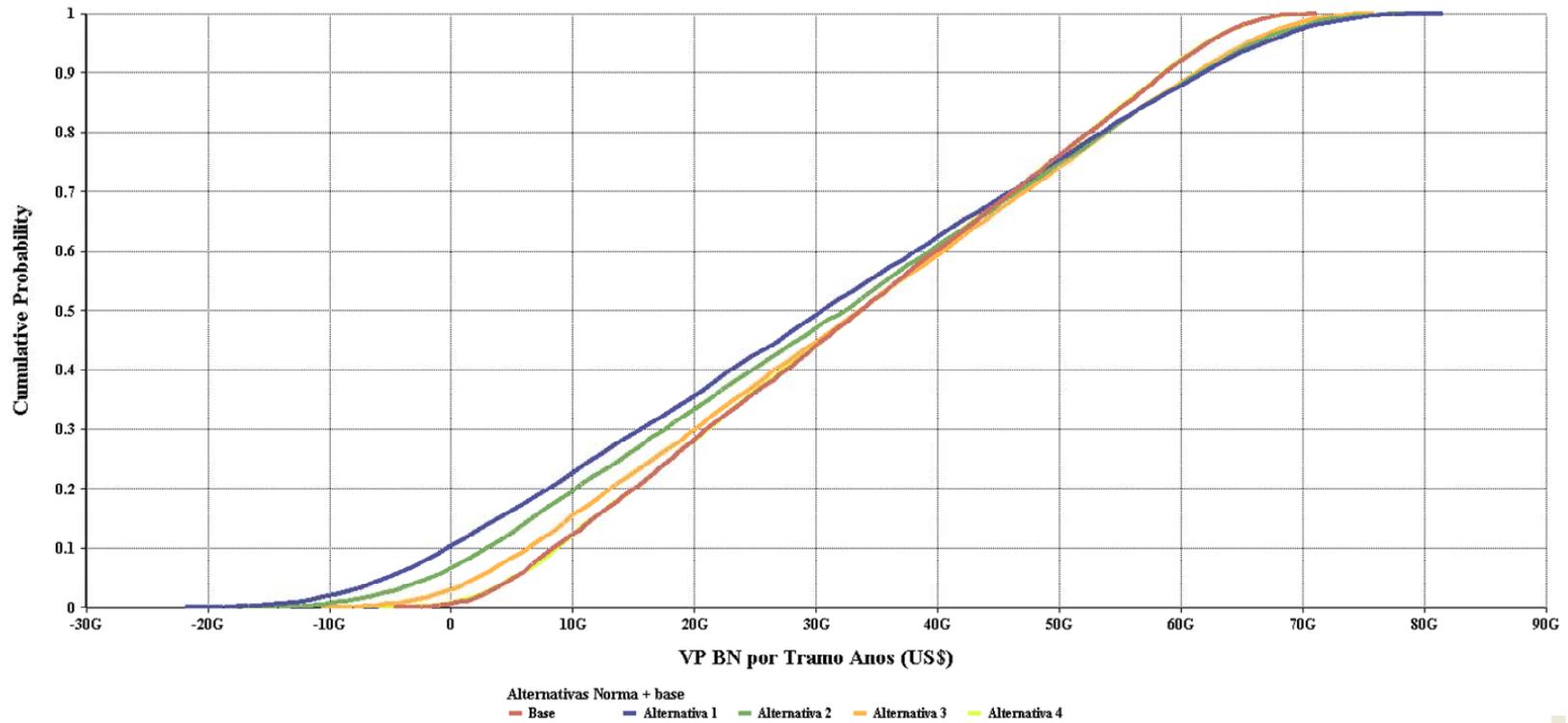
En la Figura 6-6 se presenta de manera gráfica los beneficios netos de cada alternativa analizada para cada período de 10 años, donde se puede apreciar que para algunos períodos el beneficio neto de las alternativas puede resultar negativo. Por otra parte es importante destacar que en distintos períodos se obtienen las mismas reducciones y por ende los mismos beneficios netos, por ejemplo para el segundo período de evaluación las alternativas 3 y 4 tienen el mismo nivel de exigencia ( $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de  $\text{PM}_{2.5}$ ).

Figura 6-6: Beneficios Netos por Alternativa Analizada y Período de 10 años (Millones de USD)



Fuente: Elaboración propia.

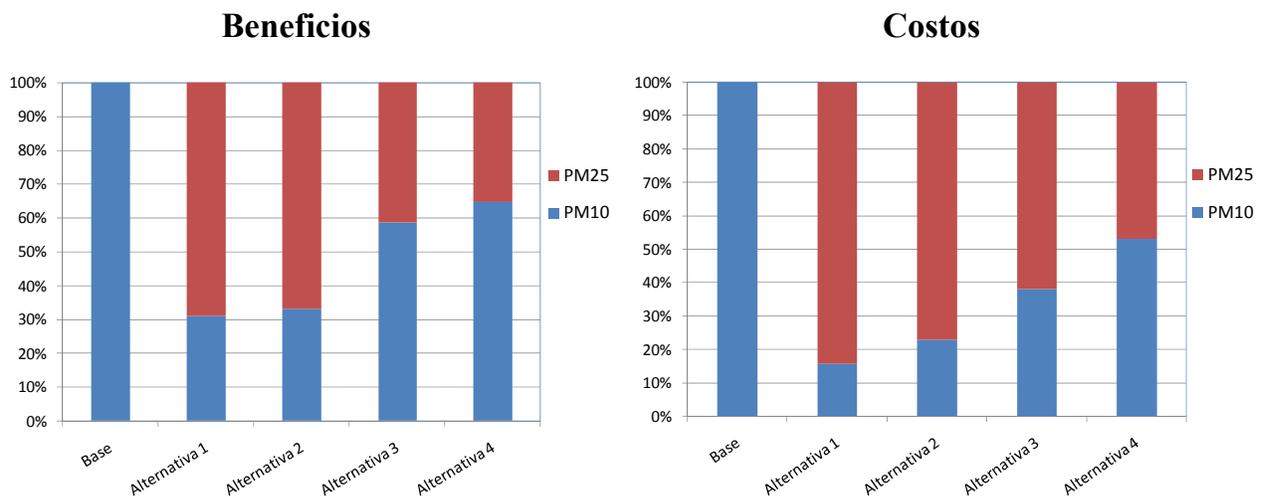
Figura 6-7: Probabilidad Acumulada vs. Beneficio Neto para periodo 2012-2041 (Millones de USD)



## 6.6 Norma de PM<sub>10</sub> vs. Norma PM<sub>2.5</sub>

Si la nueva norma de material particulado fino es implementada, de acuerdo a la metodología propuesta para estimar costos y beneficios (sección 4.2.1) puede que la norma de PM<sub>10</sub> vigente sea suficiente para cumplir con las reducciones de PM<sub>2.5</sub> exigidas por la nueva norma. En estos casos los beneficios y costos podrían ser asignados a la regulación vigente. En caso contrario los beneficios y costos corresponderían completamente a las nuevas exigencias (norma PM<sub>2.5</sub>). A continuación se presenta el porcentaje de beneficios y costos asociados a cada norma.

Figura 6-8 Aporte de Beneficios y Costos asociados a la norma de PM<sub>10</sub> vigente y de cada alternativa de norma de PM<sub>2.5</sub> analizada



Fuente: Elaboración Propia

De la figura anterior se puede observar que para las alternativas 1 y 2, la mayor parte de los beneficios y costos pueden ser asociados directamente a las nuevas exigencias de la norma propuesta para material particulado fino. En el caso de la alternativa 1 el 89% de los costos totales y el 72% de los beneficios totales corresponden a la norma de PM<sub>2.5</sub> propuesta. Por el contrario, para la alternativa 4 un 49% de los costos totales y un 37% de los beneficios totales pueden ser asociados a la nueva norma, lo que muestra que en gran parte de los casos la norma de PM<sub>10</sub> vigente sería suficiente para cumplir con las exigencias de la norma de PM<sub>2.5</sub> propuesta.

## 6.7 Análisis distributivo de costos por ciudad

La finalidad de este análisis es determinar la forma en que los recursos se repartirán entre los distintos tipos de fuentes emisoras agrupadas en sectores<sup>19</sup>, para los diferentes escenarios de implementación de norma. Adicionalmente, se busca identificar los costos que deberán incurrir los distintos agentes económicos involucrados (privados, estado y población) en cada una de las alternativas de norma evaluadas.

Dependiendo de la reducción requerida por la norma ( $R_{Req}$ ) en una ciudad en particular y de acuerdo con las medidas de abatimiento requeridas para cumplir con esta reducción al mínimo costo se determina cómo se distribuye el costo total de reducción entre las fuentes emisoras controladas. El detalle de estos cálculos y la metodología para llegar a ellos se encuentra en el IX.7. Los resultados obtenidos se detallan en la tabla siguiente y su representación gráfica en la

Figura 6-9.

Tabla 6-6: Distribución de costos por alternativa de norma y sector

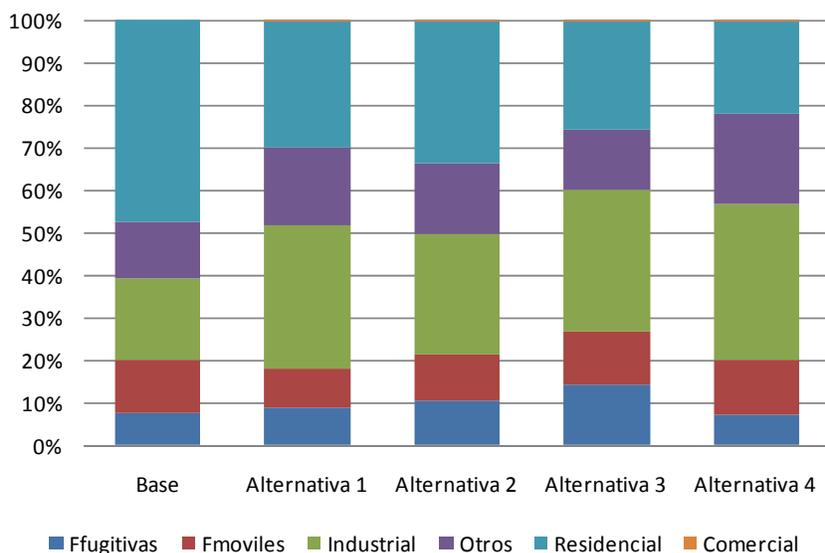
Sector	Base	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
Ffugitivas	8%	9%	10%	14%	7%
Fmoviles	12%	9%	11%	12%	13%
Industrial	19%	34%	28%	34%	37%
Otros	13%	18%	17%	14%	21%
Residencial	48%	30%	34%	26%	22%
Comercial	0%	0%	0%	0%	0%
Costos (Millones USD/año)	11,292	23,610	20,017	15,647	11,242

Fuente: Elaboración propia

En general, son los sectores industrial y residencial los que se incurrirán en los mayores costos de abatimiento.

<sup>19</sup> Sectores: residencial, comercial, industrial, otras, fuentes fijas, fuentes móviles y fuentes fugitivas

Figura 6-9: Distribución porcentual de costos por alternativa de norma y sector a nivel Nacional



Fuente: Elaboración propia

A continuación se presentan los costos totales estimados por sector.

Tabla 6-7: Costos Totales por alternativa de norma y sector (Millones de USD/año)

Sector	Base	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
Fugitivas	869	2,036	2,045	2,231	794
Fmóviles	1,371	2,226	2,210	1,922	1,456
Industrial	2,184	7,966	5,643	5,254	4,140
Otros	1,491	4,284	3,379	2,208	2,349
Residencial	5,377	7,093	6,734	4,031	2,502
Comercial	0	5	5	2	1
Saturadas	5.0	7.0	6.1	5.8	5.6
Monitoreo	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2
<b>Total</b>	<b>11,301</b>	<b>23,621</b>	<b>20,027</b>	<b>15,658</b>	<b>11,252</b>

Fuente: Elaboración propia

A partir de la distribución de costos por sector estimados, es posible determinar el total de costos por alternativa de norma de cada agente económico involucrado: sector privado, estado y población. Se ha supuesto que cada agente económico asume los costos de uno o varios de los sectores de la siguiente manera:

- El Estado asumirá los costos estimados para los sectores asociados a fuentes fugitivas (Fugitivas y otros), además de los de declaración de zona saturada y monitoreo de calidad del aire.

- El sector privado incorpora la suma de los costos del sector industrial más un 53%<sup>20</sup> de los costos de fuentes móviles, asociados a planes de mejoramiento en flota de buses y camiones entre otras medidas
- Finalmente, la Población incorpora los costos asociados al sector residencial y un 47% de las fuentes móviles (principalmente mediante medidas como la restricción vehicular a particulares).

Con respecto a beneficios se asumió la distribución propuesta por DICTUC (2001), en donde un 4% de los beneficios corresponden a ahorros de costos en atenciones hospitalarias en el sector privado, un 12% a ahorros de costos en atenciones hospitalarias en el sector público y un 84% a la disposición a pagar de la población por evitar el malestar y sufrimiento generado por eventos de morbilidad y mortalidad asociados a la contaminación atmosférica.

La Tabla 6-8 resume el valor presente de beneficios y los costos totales detallado por agente económico. La población es el sector que recibe los mayores beneficios. En los costos, si bien las diferencias no son tan marcadas, el sector privado y la población asumen la mayor parte.

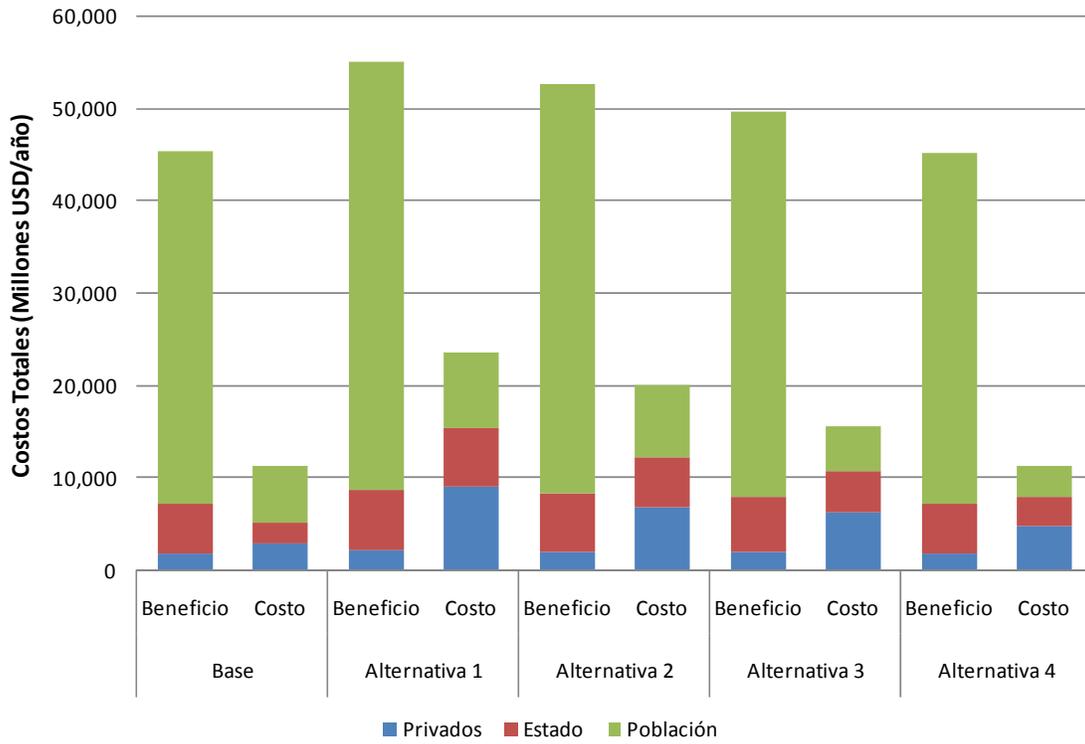
Tabla 6-8: VP de los Beneficios y Costos por agente económico (Millones de USD/año)

Item	Base	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
<b>Beneficios</b>					
Privados	1,809	2,197	2,105	1,986	1,806
Estado	5,428	6,591	6,316	5,959	5,417
Población	37,999	46,139	44,215	41,711	37,918
<b>Total</b>	<b>45,237</b>	<b>54,928</b>	<b>52,637</b>	<b>49,656</b>	<b>45,140</b>
<b>Costos</b>					
Privados	2,910	9,151	6,820	6,275	4,913
Estado	2,370	6,331	5,435	4,449	3,153
Población	6,021	8,139	7,772	4,934	3,186
<b>Total</b>	<b>11,301</b>	<b>23,621</b>	<b>20,027</b>	<b>15,658</b>	<b>11,252</b>

Fuente: Elaboración propia

<sup>20</sup> En el AGIES PPDA, (DICTUC (2008)), se determinó que las medidas de abatimiento consideradas para controlar las emisiones de fuentes móviles implican costos tanto para el sector privado (a través de medidas como el post tratamiento de buses y camiones) como para la población (a través de medidas como la restricción vehicular).

Figura 6-10: VP de los Beneficios y Costos por agente económico (Millones de USD/año)



Fuente: Elaboración propia

## 7. Conclusiones

La evidencia científica ha mostrado que la exposición al material particulado (PM) suspendido en el aire tiene efectos perjudiciales para la salud de las personas, tanto en los países desarrollados como en desarrollo, existiendo una creciente evidencia de que las partículas más finas del material particulado (PM<sub>2.5</sub>) tienen un impacto en la salud mayor.

Los efectos de la salud son amplios, pero se producen particularmente en el sistema respiratorio y cardiovascular, afectando a toda la población. (OMS, 2005).

Por otra parte la evidencia científica actual ha demostrado que no se puede proponer niveles de contaminación atmosférica que ofrezcan protección completa contra los efectos perjudiciales del material particulado PM<sub>10</sub> y el material particulado fino PM<sub>2.5</sub>. El antiguo paradigma de que existe una concentración bajo la cual no existen efectos nocivos para la salud (el llamado 'umbral') ha sido consistentemente desmentido por los resultados de los estudios científicos modernos. De este modo, al no existir un nivel seguro, las normas deben tender a los niveles más bajos posibles, dadas las limitaciones, capacidades y prioridades de la salud pública locales (OMS, 2005)

Con respecto a los riesgos individuales, se mantiene la conclusión que el impacto de la exposición a PM<sub>2.5</sub>, produce a largo plazo aproximadamente tres veces el riesgo de muerte en accidentes de tránsito, para el caso de Santiago, y produce un riesgo aún mayor en otras localidades como Tocopilla para adultos mayores de 65 años.

De acuerdo a los antecedentes anteriores se justifica la implementación de niveles de norma para el material particulado fino entre los más bajos observados internacionalmente. Con esto y tomando en cuenta las consideraciones del estudio anterior realizado por el consultor, respecto a lograr niveles de exposición cada vez menores, en este estudio se considera alcanzar para el año 2032 el objetivo de exposición recomendado por la OMS (10 µg/m<sup>3</sup>), en tres de las 4 alternativas elegidas para la norma anual de PM<sub>2.5</sub>.

Con respecto a los costos y beneficios, se obtiene que la implementación de la norma de PM<sub>2.5</sub> por sobre la norma de PM<sub>10</sub> produce beneficios sociales netos positivos, en todas los casos analizados.

Por otra parte el presente análisis puede ser conservador, subestimando costos y beneficios, por varias razones:

1. Los costos de control de emisiones pueden disminuir más de un 1% anual, que corresponde al porcentaje utilizado en el análisis.
2. La renovación del parque natural de vehículos no fue considerada en el Estudio, esto abarata los costos asumidos ya que los nuevos vehículos son mucho menos contaminantes a un precio similar a los antiguos.
3. En este análisis, no fue incluida la disminución de emisiones que forman ozono. Muchos de los precursores de PM<sub>2.5</sub> secundario son también precursores de ozono (NO<sub>x</sub>, COV, CO), por lo tanto la reducción de estos precursores tiene como efecto una disminución de los niveles de O<sub>3</sub>, que generan beneficios adicionales.

4. Para un plazo de 30 años es esperable que Chile deba adoptar medidas de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Estas medidas tienen sinergias con las medidas de reducción de material particulado que no fueron consideradas en el análisis. Esta interacción se traduce en una menor reducción requerida por la norma de de  $PM_{2.5}$ , y por lo tanto en una mejor medida de beneficio neto.
5. Finalmente la estimación de costos de reducción de emisiones han mostrado ser siempre sobre-estimaciones, un ejemplo de esto es que los costos de reducción de emisiones de automóviles fueron sobreestimados en un alto factor (cita de CEO de General Motors que dijo que las regulaciones de emisiones llevarían a la industria a la quiebra en el año 1974).

A pesar de las simplificaciones realizadas en el análisis, los resultados obtenidos en el estudio presentan una estimación razonable a nivel estratégico que cumple con el objetivo de proveer antecedentes para la realización del AGIES correspondiente.

En este análisis se incluyó además un estudio del número de casos evitados para los distintos efectos a la salud y las distintas alternativas estudiadas. De acuerdo a los resultados obtenidos se puede concluir que la alternativa 1 entregaría la mayor cantidad de casos evitados al implementarse y el mayor aumento de esperanza de vida.

El análisis muestra que las alternativas 3 y 4 presentan los mayores beneficios sociales netos, pero por otra parte muestra que las alternativas 1 y 2 evitan un mayor número de eventos de mortalidad y morbilidad, a mayores costos.

Del análisis se concluye que parece adecuado controlar específicamente la fracción fina ya que los beneficios exceden los costos de control. Por lo tanto, se recomienda iniciar el proceso de normalización de  $PM_{2.5}$ .

Se comprará adicionalmente los resultados obtenidos en el estudio, en que el análisis de costos y beneficios se realizó completando la información de concentraciones para las ciudades sin datos disponibles, versus un escenario considerando sólo las ciudades con información disponible. Los resultados indican que el beneficio neto estimado no presenta variaciones sustanciales salvo para el percentil 10 de las estimaciones realizadas. De este análisis se puede concluir que para obtener mayor precisión en los intervalos de confianza estimados es importante realizar un mayor número de campañas de monitoreo en las localidades sin información que permitirían completar el análisis y determinar si otras ciudades no monitoreadas actualmente presentan problemas de contaminación relevantes. (para mayor detalle de este análisis ver Anexo V)

## 8. Referencias

Abbey, D. E., B. E. Ostro, et al. (1995). "Chronic Respiratory Symptoms Associated with Estimated Long-Term Ambient Concentrations of Fine Particulates Less Than 2.5 Microns in Aerodynamic Diameter (PM 2.5) and Other Air Pollutants." Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology **5**(2): 137-159.

AIRNET (2005). Air pollution and the risks to human health-Exposure assessment. J. N. and S. E.

Alberini, M., T. F. Cropper, et al. (1997). "Valuing health effects of air pollution in developing countries: The case of Taiwan." J. Environ. Econom. Management **34**: 107-126

Bell, M. L., M. S. O'Neill, et al. (2005). "International Symposium on Socioeconomic Factors and Air Pollution Health Effects." Environmental Science and Technology **accepted**.

Borja-Aburto, V. H., M. Castillejos, et al. (1998). "Mortality and ambient fine particles in Southwest Mexico City, 1993-1995." Environmental Health Perspectives **106**(12): 849-855.

Borja-Aburto, V. H., D. P. Loomis, et al. (1997). "Ozone, suspended particulates, and daily mortality in Mexico City." American Journal of Epidemiology **145**(3): 258-68.

Burnett, R. T. and M. S. Goldberg (2003). "Size-Fractionated Particulate Mass and Daily Mortality in Eight Canadian Cities." Research Report - Health Effects Institute: 85-89.

Burnett, R. T., M. Smith-Doiron, et al. (1999). "Effects of particulate and gaseous air pollution on cardiorespiratory hospitalizations." Arch Environ Health **54**(2): 130-9.

Castillejos, M., V. Borja-Aburto, et al. (2000). "Airborne coarse particles and mortality." Inhalation Toxicology **12**(Suppl 1): 61-72.

Chock, D. P., W. SL, et al. (2000). "A study of the association between daily mortality and ambient air pollutant concentrations in Pittsburgh, Pennsylvania." J Air Waste Manag Assoc. **50**(8): 1481-500.

Cifuentes, L., A. Krupnick, et al. (2005). Urban air quality and human health in Latin America and The Caribbean.

Cifuentes, L. A., J. Vega, et al. (2000). "Effect of the fine fraction of particulate matter versus the coarse mass and other pollutants on daily mortality in Santiago, Chile." Journal of the Air & Waste Management Association **50**(8): 1287-98.

Cohen, A. J., H. R. Anderson, et al. (2004). Chapter 17: Mortality impacts of urban air pollution. Comparative Quantification of Health Risks: Global and Regional Burden of Disease Due to Selected Major Risk Factors. M. Ezzati, A. Lopez, A. Rodgers and C. Murray. Geneva, World Health Organization. **vol. 2**.

COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES (2005). Proposal for a DIRECTIVE OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on ambient air quality and cleaner air for Europe. Brussels, 21.9.2005.

Conceicao, G. M., S. G. Miraglia, et al. (2001). "Air pollution and child mortality: a time-series study in Sao Paulo, Brazil." Environmental Health Perspectives. **109**(Suppl 3): 347-50.

CONSEJO, P. E. Y. D. ( 2008). DIRECTIVA 2008/50/CE relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa. Union Europea.

Dockery, D. W., C. A. Pope III, et al. (1993). "An association between air pollution and mortality in Six U.S. Cities." The New England Journal of Medicine **329**: 1753-1759.

Environmental Protection Agency , E. (2008). Air Quality Index Reporting and Significant Harm Level for Fine Particulate Matter, proposed rule.

EPA (1999a). The Benefits and Costs of the Clean Air Act 1990 to 2010, U. S. EPA.

EPA (2004). Air Quality Criteria for Particulate Matter. Research Triangle Park, N.C., U.S. Environmental Protection Agency.

Fairley, D. (2003). "Mortality and Air Pollution for Santa Clara County, California,1989–1996." Research Report - Health Effects Institute: 97-106.

Gouveia, N. and T. Fletcher (2000). "Time series analysis of air pollution and mortality: effects by cause, age and socioeconomic status." J Epidemiol Community Health **54**(10): 750-5.

HEI (2004). Health Effects of outdoor air pollution in developing countries of Asia: a literature review.

. Special Report 15. Boston, MA, Health Effects Institute

HEI International Scientific Oversight Committee (2004). Health Effects of Outdoor Air Pollution in Developing Countries of Asia: A Literature Review. Special Report 15. HEI. Boston MA, USA, Health Effects Institute: 124.

Hoek, G., B. Brunekreef, et al. (2002). "Association between mortality and indicators of traffic-related air pollution in the Netherlands: a cohort study." Lancet **360**(9341): 1203-9.

ICD9 The international classification of diseases 9th revision

Illabaca, M., I. Olaeta, et al. (1999). "Association between Levels of Fine Particulate and Emergency Visits for Pneumonia and other Respiratory Illnesses among Children in Santiago, Chile." Journal of the Air & Waste Management Association **49**: 174-185.

Ito, K. (2003). "Associations of Particulate Matter Components with Daily Mortality and Morbidity in Detroit, Michigan." Journal of Exposure Analysis & Environmental Epidemiology. **11**(1): 143-156.

Jerrett M, B. RT, et al. (2005). "Spatial analysis of air pollution and mortality in Los Angeles." Epidemiology **6**(16): 727-36.

Katsouyanni K, T. G, et al. (2001). "Confounding and effect modification in the short-term effects of ambient particles on total mortality: results from 29 European cities within the APHEA2 project." Epidemiology **5**(12): 521-31.

Klemm, R. J. and R. Mason (2003). "Replication of Reanalysis of Harvard Six-City Mortality Study." Research Report - Health Effects Institute: 165-172.

Krewski (2003). "Overview of the reanalysis of the Harvard Six Cities Study and American Cancer Society Study of Particulate Air Pollution and Mortality. ." Journal of Toxicology and Environmental Health.Part A. **66** (16-19):1507-1551.

Krewski, D., R. T. Burnett, et al. (2000). Reanalysis of the Harvard Six Cities Study and the American Cancer Society Study of Particulate Air Pollution and Mortality. Investigators' Report

Part I: Replication and Validation. Part II: Sensitivity Analyses. Cambridge, MA, Health Effects Institute.

Krewski, D., R. T. Burnett, et al. (2000). Reanalysis of the Harvard Six Cities Study and the American Cancer Society Study of Particulate Air Pollution and Mortality. Investigators' Report Part I: Replication and Validation. Part II: Sensitivity Analyses. Cambridge, MA, Health Effects Institute.

Levy, J. I., J. K. Hammitt, et al. (2000). "Estimating the mortality impacts of particulate matter: what can be learned from between-study variability?" Environ Health Perspect **108**(2): 109-17.

Lipfert, F. W., S. C. Morris, et al. (2000). "Daily mortality in the Philadelphia metropolitan area and size-classified particulate matter." J Air Waste Manag Assoc. **50**(8): 1501-13.

Loomis, D., M. Castillejos, et al. (1999). "Air pollution and infant mortality in Mexico City." Epidemiology **10**(2): 118-23.

Mar, T. F., N. G.A., et al. (2003). "Air Pollution and Cardiovascular Mortality in Phoenix, 1995–1997." Research Report - Health Effects Institute.

Morel, B., S. Yeh, et al. (1999). "Statistical Distributions For Air Pollution Applied To The Study Of The Particulate Problem In Santiago, Chile." Atmospheric Environment **33**: 2575-2585.

NRC (2004). Research priorities for airborne particulate matter: IV. Continuing research progress. C. o. R. P. f. A. P. Matter, National Research Council.

O'Neill, M. S., M. Jerrett, et al. (2003). "Health, wealth, and air pollution: advancing theory and methods." Environ Health Perspect **111**(16): 1861-70.

Ostro, B., R. Broadwin, et al. (2003). "Coarse particles and daily mortality in Coachella Valley, California." Research Report - Health Effects Institute.

PAHO (2005). An Assessment of Health Effects of Ambient Air Pollution in Latin America and the Caribbean. A. o. S. D. a. E. Health, World Health Organization.

Pereira, L. A., D. Loomis, et al. (1998). "Association between air pollution and intrauterine mortality in Sao Paulo, Brazil." Environmental Health Perspectives **106**(6): 325-9.

Pope, C. A., 3rd, R. T. Burnett, et al. (2002). "Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution." Jama **287**(9): 1132-41.

Pope, C. A., 3rd, R. T. Burnett, et al. (2004). "Cardiovascular Mortality and Long-Term Exposure to Particulate Air Pollution: Epidemiological Evidence of General Pathophysiological Pathways of Disease." Circulation **109**(1): 71-77.

Pope, C. A., 3rd and D. W. Dockery (2006). "Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect." Journal of the Air & Waste Management Association **56**(6): 709-42.

Pope, C. A., 3rd, M. J. Thun, et al. (1995). "Particulate air pollution as a predictor of mortality in a prospective study of U.S. adults." American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine **151**: 669-674.

Samet, J. M., F. Dominici, et al. (2000). "Fine particulate air pollution and mortality in 20 U.S. cities, 1987- 1994." N Engl J Med **343**(24): 1742-9.

Schwartz, J. (1996). "Air Pollution and hospital admissions for respiratory disease." Epidemiology **7**(1): 20-28.

Simpson, R. W., D. L., et al. (2000). "Effects of ambient particle pollution on daily mortality in Melbourne, 1991-1996." J Expo Anal Environ Epidemiol. **10**(5): 488-96.

Tellez-Rojo, M. M., I. Romieu, et al. (2000). "Daily respiratory mortality and PM10 pollution in Mexico City: importance of considering place of death." Eur Respir J **16**(3): 391-6.

Unión Europea (1999). DIRECTIVA 1999/30/CE DEL CONSEJO. 1999/30/CE: 20.

Venners, S. A., B. Wang, et al. (2003). "Particulate Matter, Sulfur Dioxide, and Daily Mortality in Chongqing, China." Environmental Health Perspectives **111**(4): 562-567.

World Health Organization (2005). WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. Global update 2005. Summary of risk assessment. W. H. Organization. Geneva, Switzerland, World Health Organization: 22.



## **Anexos**

## Anexo I. Estudios que han servido de apoyo a la dictación de normas

En la siguiente sección se describen los estudios internacionales y nacionales relevantes para la dictación de normativa para la regulación de material particulado fino.

### I.1 Estudios en USA

Los principales estudios que han sustentado la normativa internacional son los realizados en USA y corresponden a los autores que se indican en la Tabla 0-1:

Tabla 0-1: Principales Estudios realizados en USA

<b>Autores</b>	<b>Descripción</b>	<b>Normas en que han sido citados</b>
(Pope, Thun et al. 1995)	En el estudio realizado en la población de USA el riesgo relativo ajustado (95% CI) para todas las causas de mortalidad para las áreas más contaminadas comparadas con las áreas menos contaminadas fue de 1.17 (1.09-1.26) para PM2.5.	OMS, USEPA, California EPA
(Pope, Burnett et al. 2002)	El mismo autor encontró que por cada aumento de 10 mg/m <sup>3</sup> de PM2.5 se produce un aumento del riesgo de 4%, 6%, y 8% para todas las causas, mortalidad cardiopulmonar y mortalidad por cáncer pulmonar, respectivamente.	OMS, USEPA, Australia.
(Dockery, Pope III et al. 1993)	2. El "Six Cities Study" encuentra un riesgo relativo ajustado de mortalidad para la ciudad más contaminada versus la menos contaminada de 1.26 (95 % CI, 1.08-1.47)	OMS, USEPA, California EPA, México, Canadá, Australia.
(Krewski, Burnett et al. 2000)	La auditoria que demostró que los datos en el análisis original del "Six Cities Study" y del "ACS Study" fueron de alta calidad, así como lo fueron los estimadores de riesgo.	Australia.

Fuente: Elaboración propia

## I.2 Estudios Latinoamericanos

Los estudios latinoamericanos que han sido citados para dictar normas, en particular, las normas de México y USA, son los siguientes:

Tabla 0-2: Resumen Estudios Latinoamericanos

Autores	Descripción	Normas en que han sido citados
Santiago de Chile (Cifuentes, Vega et al. 2000)	Se estudió por series de tiempo la mortalidad no accidental en 34 municipalidades de Santiago entre los años 1988 y 1996 asociada a PM2.5, PM10-2.5, CO, SO2, NO2 y O3. Se controló para condiciones estacionales y meteorológicas. Se analizaron los datos con modelos de simples y de dos contaminantes. Los efectos en mortalidad para el modelo simple de PM2.5 y PM10-2.5 arrojaron un riesgo relativo de 1.042 y 1.043 en todas las estaciones.	USEPA.
Santiago de Chile (Illabaca, Olaeta et al. 1999)	Se estudió por series de tiempo el impacto entre la variación ambiental de PM2.5 y otros contaminantes y el número de visitas diarias a la sala de emergencia por causas respiratorias al Hospital Calvo Mackenna, de niños menores de 15 años, se estima que la población que se atiende en ese hospital es de alrededor de 124.200 niños, entre los febrero de 1995 y agosto de 1996. Las mayores concentraciones de material particulado se registraron durante los meses de invierno.	México.
Ciudad de México (Castillejos, Borja-Aburto et al. 2000)	Se estudió mortalidad en Ciudad de México y su relación con PM10 y PM2.5. Se monitorearon los contaminantes y el material particulado grueso fue estimado de la diferencia de PM10 y Pm2.5 recolectado. Se analizaron los datos con modelos de simples y de dos contaminantes Se entregan resultados para mortalidad total, mortalidad por causas respiratorias y cardiovasculares. Los resultados muestran asociaciones mayores de mortalidad con la fracción gruesa del material particulado. Cada aumento de 10 µg/m3 de PM10 y PM2.5 con un desfase de 5 días estaba asociado a aumentos de 1.83% y 1.48% en mortalidad total respectivamente.	México, USEPA.
Ciudad de México (Loomis, Castillejos et al. 1999)	Estudio de series de tiempo en Ciudad de México sobre mortalidad infantil asociada a SO2, O3, PM2.5, NO2. Cada aumento de 10 µg/m3 de PM2.5 con un desfase de 2 días estaba asociado a aumentos de 5.87% en mortalidad total respectivamente (95% CI, 1.21-10.53).	México, USEPA.
Ciudad de México (Borja-Aburto, Castillejos et al. 1998)	Estudio en 6 sectores de Ciudad de México: Obregón, Benito Juárez, Coyoacan, Cuajimalpa, Magdalena Contreras y Tlalpan, que tiene una población de alrededor de 2.5 millones de habitantes. Se estudiaron asociaciones entre PM2.5, O3 y NO2 y mortalidad. El porcentaje de cambio en mortalidad total para todas las causas de mortalidad para aumentos de 10 µg/m3 de PM2.5 fue de 1.36 (95%CI, 0.20-2.52).	USEPA.
Ciudad de México (Tellez-Rojo, Romieu et al. 2000)	Estudio de mortalidad por causas respiratorias en Ciudad de México. No se entrega evidencia de PM fino.	México, USEPA.

---

Ciudad de México (Borja-Aburto, Loomis et al. 1997)	Estudio de mortalidad en el Distrito Federal de México. No se entrega evidencia de PM fino.	USEPA.
Sao Pablo de Brazil (Pereira, Loomis et al. 1998)	Estudio de mortalidad intrauterina en Ciudad de México. No se entrega evidencia de PM fino.	USEPA.
Sao Pablo de Brazil (Gouveia and Fletcher 2000)	Se investigó la asociación entre contaminación por PM10, SO2, NO2, O3 y CO y mortalidad. No se entrega evidencia de PM fino y grueso.	USEPA.
Sao Pablo de Brazil (Conceicao, Miraglia et al. 2001)	Estudio de mortalidad en el Sao Paulo, Brasil. No se entrega evidencia de PM fino.	USEPA.

---

Fuente: Elaboración propia

### I.3 Otros Estudios relevantes

Otros estudios relevantes para la dictación de normativa internacional son:

Tabla 0-3: Otros Estudios relevantes

Autores	Descripción	Normas en que han sido citados
(Abbey, Ostro et al. 1995)	Adventistas del Séptimo Día (n = 1,868) completaron un cuestionario de síntomas respiratorios en 1977 y 1987. Exceso de concentraciones de 20 mg/m <sup>3</sup> de PM <sub>2.5</sub> fueron asociadas con el desarrollo de síntomas de bronquitis crónica.	USEPA, Australia.
(Burnett and Goldberg 2003)	Un estudio sobre las 8 ciudades canadienses de Montreal, Ottawa, Toronto, Windsor, Calgary, Edmonton Winnipeg, Vancouver, entre los años 1986-1996, comparó niveles de sulfatos, O <sub>3</sub> , CO, NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> . Este estudio encontró diferencias en asociaciones entre PM <sub>2.5</sub> y PM <sub>10-2.5</sub> con mortalidad. Para aumentos de 50 µg/m <sup>3</sup> en PM <sub>10</sub> o 25 µg/m <sup>3</sup> en PM <sub>2.5</sub> , las admisiones a hospitales por enfermedad cardiovascular son de 12.1% (1.4, 23.8) y 7.2% (-0.6, 15.6) y de 20.5% (8.2, 34.1) para aumentos de PM <sub>10-2.5</sub> .	USEPA.
(Burnett, Smith-Doiron et al. 1999)	En Toronto entre 1980 y 1994 se asoció PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> y PM <sub>10-2.5</sub> con 1.9%, 3.3%, y 2.9% aumentos en admisiones hospitalarias respiratorias y cardíacas respectivamente. Al controlar por contaminantes gaseosos (CO, NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> ) los porcentajes se redujeron a 0.50%, 0.75% y 0.77%, respectivamente. De las 7.72 admisiones hospitalarias diarias en exceso en Toronto atribuibles a la mezcla de contaminación atmosférica 11.8% resultaron de PM <sub>2.5</sub> , 8.2% de PM <sub>10-2.5</sub> y el resto a los contaminantes gaseosos.	USEPA, Australia.
(Chock, SL et al. 2000)	El estudio realizado en Pittsburg, Pensilvania entre 1989 y 1991 evaluó mortalidad diaria en 2 grupos etarios (mayores y menores a 75 años) asociadas a PM <sub>10</sub> , CO, O <sub>3</sub> , SO <sub>2</sub> , NO <sub>2</sub> , y PM fino y grueso. El porcentaje de aumento de mortalidad por cada 25 µg/m <sup>3</sup> para PM <sub>2.5</sub> y PM <sub>10-2.5</sub> fue de 2.6% (95% CI, 2.0, 7.3) y de 0.7% (95% CI, -1.7, 3.7) para personas menores a 75 años, mientras que el porcentaje de aumento de mortalidad por cada 25 µg/m <sup>3</sup> para PM <sub>2.5</sub> y PM <sub>10-2.5</sub> fue de 1.5% (95% CI, -3.0, 6.3) y de 1.3% (95% CI, -1.3, 3.8) para personas mayores a 75 años.	USEPA.
(Fairley 2003)	El estudio de Santa Clara mostró asociaciones para mortalidad total usando los modelos GAM y GLM respectivamente por aumentos de 50 µg/m <sup>3</sup> para PM <sub>10</sub> y 25 µg/m <sup>3</sup> para PM <sub>2.5</sub> y PM <sub>10-2.5</sub> de: 7.8(95% CI, 2.8,13.1) y 8.3(95% CI, 2.9, 13.9) para PM <sub>10</sub> ; 8.2(95% CI, 1.6, 15.2) y 7.1(95% CI, 1.4, 13.1) para PM <sub>2.5</sub> ; 4.5(95% CI, -7.6, 18.1) y 3.3(95% CI, -5.3, 12.7) para PM <sub>10-2.5</sub> .	USEPA.
(Ito 2003)	El estudio de mortalidad en Detroit mostró asociaciones para mortalidad total usando dos modelos GAM (Generalized Additive Model) y GLM (Generalized Linear Model) respectivamente por aumentos de 50 µg/m <sup>3</sup> para PM <sub>10</sub> y 25 µg/m <sup>3</sup> para PM <sub>2.5</sub> y PM <sub>10-2.5</sub> de: 3.3(95% CI, -2.0, 8.9); 3.1(95% CI, -2.2, 8.7) para PM <sub>10</sub> con 1 día de desfase; 1.9 (95% CI, -1.8,5.7); 2.0(95% CI, -1.7, 5.8) para PM <sub>2.5</sub> con 3 días de desfase; 3.2(95% CI, -1.9, 8.6); 2.8(95% CI, -2.2, 8.1) para PM <sub>10-2.5</sub> con 1 día de desfase.	USEPA.
(Jerrett M, RT et al. 2005)	El estudio realizado en Los Angeles todas las causas de mortalidad entregaron un riesgo relativo de 1.17 (95% CI, 1.05-1.30) para un aumento de 10 mg/m de PM <sub>2.5</sub> . Los RR para mortalidad como consecuencia de enfermedad cardíaca isquémica y cáncer de pulmón fueron elevados y estuvieron en el rango de 1.24-1.6, dependiendo del modelo utilizado.	OMS.

(Katsouyanni K, G et al. 2001)	Un estudio realizado en Europa en 29 ciudades donde se asocia PM10 y mortalidad.	OMS, USEPA.
(Klemm and Mason 2003)	En el re-análisis del "Six Cities Study" se estudiaron por separado PM10, PM grueso y fino. Los estimadores de riesgo de mortalidad no accidental para aumentos de 25 µg/m3 (promedio de desfase de 0 a 1 día) en las 6 ciudades combinadas fueron de 3.0% (CI: 2.1-4.0) y 0.8% (CI: -0.5-2.0) para PM2.5 y PM10-2.5.	USEPA, Australia.
(Levy, Hammitt et al. 2000)	Por otro lado, otro estudio en USA reportó que los efectos de PM10 fueron mayores en ciudades donde el PM2.5 era una proporción mayor del material particulado.	OMS, USEPA.
(Lipfert, Morris et al. 2000)	Un estudio investigó las asociaciones entre mortalidad diaria y contaminación atmosférica usando datos de Philadelphia entre 1992 y 1995. El riesgo atribuible promedio a aumentos de: 25 µg/m3 para PM2.5 fue de 0,0423; 25 µg/m3 para PM10-2.5 fue de 0,0517; 50 µg/m3 para PM10 fue de 0,0609.	USEPA.
(Mar, G.A. et al. 2003)	Un estudio realizado en Phoenix encontró asociaciones para mortalidad total y mortalidad cardiovascular de: 5.4 (95% CI, 0.1-11.1) por aumentos de 50 µg/m3 de PM10; 3.0 (95% CI, -0.5-6.6) por aumentos de 25 µg/m3 de PM10-2.5; y 3.0 (95% CI, -0.7-6.9) por aumentos de 25 µg/m3 de PM2.5 sin desfase.	USEPA, Australia.
(Ostro, Broadwin et al. 2003)	El re-análisis realizado en Coachella Valley, California, reportó asociaciones entre mortalidad cardiovascular y material particulado. Usando los modelos GAM y GLM respectivamente por aumentos de 50 µg/m3 para PM10 y 25 µg/m3 para PM2.5 y PM10-2.5 de: 5.5 (95% CI, 1.6-9.5) y 5.1 (95% CI, 1.2-9.1) para PM10; 10.2 (95% CI, (-5.3-28.3) y sin información para PM2.5; 2.9 (95% CI, 0.7-5.2) y 2.7 (95% CI, 0.5-5.1) para PM10-2.5.	USEPA.
(Samet, Dominici et al. 2000)	Un estudio realizado en 20 ciudades de USA donde se asocia PM10 y mortalidad.	OMS, USEPA, Australia.
(Schwartz 1996)	El estudio de material particulado fino en 6 ciudades de USA que asocia PM2.5 con mortalidad.	USEPA, Australia.
(Simpson, L. et al. 2000)	Un estudio en Melbourne, Australia, realizado entre los años 1991 y 1996 encontró asociaciones para aumentos de 1 µg/m3 en 24-h PM2.5 en la estación cálida de 0.38% (95% CI = 0.06-0.70%) aumentos de riesgo de todas las causas de mortalidad y de 1.18% (95% CI = 0.05-2.32%) aumentos en riesgos de mortalidad respiratoria.	Australia.
(HEI International Scientific Oversight Committee 2004) (Hoek, Brunekreef et al. 2002) (Venners, Wang et al. 2003)	El documento cita además de los artículos descritos, este documento agrega un estudio realizado en los países bajos que confirma efectos por exposición de largo plazo (en particular contaminación por tráfico de vehículos), también destaca un estudio realizado en Chongqing, China donde los autores observaron una asociación entre niveles de PM2.5 (0-5 días) con todas las causas de mortalidad (RR después de 1 día = 0.98 por 100 µg/m3 [95% CI 0.91-1.04]).	OMS.

Fuente: Elaboración propia

## Anexo II. Antecedentes de Normas Internacionales

La investigación y regulación del material particulado han tenido un crecimiento explosivo a nivel mundial durante los últimos 15 años. Desde que la USEPA decidió a comienzos de los años 90 estudiar una norma para PM<sub>2.5</sub>, otros estados y organización la han emulado, tanto en el primer como en el tercer mundo. Una revisión de la literatura muestra que, después de los Estados Unidos y California, Australia, Canadá, México y Ecuador han dictado estándares para PM<sub>2.5</sub>. Además, la Organización Mundial de la Salud (OMS) actualizó sus guías para este contaminante. A continuación se revisa la normativa de los países y organizaciones que han normado el material particulado fino.

### II.1 Guías de la OMS

En respuesta a la vasta evidencia científica internacional con respecto a la incidencia de la concentración de material particulado fino en el aumento de la morbilidad y mortalidad de la población, el año 2000 la OMS publica<sup>21</sup> las primeras recomendaciones para la implementación de normativas locales para las concentraciones de este contaminante.

Debido a que con la información disponible en el 2000 no era posible establecer un nivel seguro para las concentraciones de material particulado fino, la OMS no recomendó valores guías. En el reporte se recomendaba los valores de riesgo en tablas, y que cada país decidiera su valor.

Las guías de 2000 prácticamente no se usaron debido a que los tomadores de decisiones no pudieron usar correctamente las tablas. Usarlas requiere establecer un nivel de riesgo aceptable para la población, lo que es un tema bastante delicado.

En 2005 la Organización Mundial de la Salud (OMS) actualizó sus valores guía respecto al material particulado ((World Health Organization 2005)). En esta revisión la OMS cambió su política anterior, de recomendar un riesgo unitario y dejar que cada país decidiera basado en sus preferencias un valor límite, por recomendaciones explícitas de valores guía. La norma anual se basa exclusivamente en los estudios de cohorte realizados en EE.UU, y que resultan en aumentos de riesgo de mortalidad de 6% por cada 10 µg/m<sup>3</sup> de PM<sub>2.5</sub>, para concentraciones anuales. Para la norma diaria, se consideró la evidencia existente en múltiples estudios de series temporales realizados en muchos países del mundo, y que resultan en un aumento del riesgo de muerte de 1% por cada 10 µg/m<sup>3</sup> de PM<sub>2.5</sub>, para concentraciones diarias. Los valores guía de PM<sub>10</sub> se derivaron a partir de los valores guía de PM<sub>2.5</sub>, suponiendo una razón PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> de 0.5, la que se podría cambiar si se tiene evidencia de valores diferentes. La Tabla 0-4 resume las recomendaciones de la OMS.

---

<sup>21</sup> OMS (2000)

Tabla 0-4: Recomendaciones de calidad del aire de la OMS y objetivos intermedios para el material particulado

Guías y Objetivos	(µg/m <sup>3</sup> )		Fundamento del nivel elegido
	PM10	PM2.5	
<b>Concentraciones medias anuales*</b>			
Objetivo intermedio-1 (OI-1)	70	35	Estos niveles están asociados con un riesgo de mortalidad a largo plazo alrededor de un 15% mayor que con el nivel de las GCA.
Objetivo intermedio-2 (OI-2)	50	25	Además de otros beneficios para la salud, estos niveles reducen el riesgo de mortalidad prematura en un 6% aproximadamente [2-11%] en comparación con el nivel del OI-1.
Objetivo intermedio-3 (OI-3)	30	15	Además de otros beneficios para la salud, estos niveles reducen el riesgo de mortalidad en un 6% [2-11%] aproximadamente en comparación con el nivel del OI-2.
Guía de calidad del aire (GCA)	20	10	Estos son los niveles más bajos con los cuales se ha demostrado, con más del 95% de confianza, que la mortalidad total, cardiopulmonar y por cáncer de pulmón, aumenta en respuesta a la exposición prolongada al MP2.5.
<b>Concentraciones de 24 horas**</b>			
Objetivo intermedio-1 (OI-1)	150	75	Basado en coeficientes de riesgo publicados en estudios multicéntricos y meta-análisis (incremento de alrededor del 5% de la mortalidad a corto plazo sobre el valor de las GCA).
Objetivo intermedio-2 (OI-2)	100	50	Basado en coeficientes de riesgo publicados en estudios multicéntricos y meta-análisis (incremento de alrededor del 2,5% de la mortalidad a corto plazo sobre el valor de las GCA).
Objetivo intermedio-3 (OI-3)***	75	37,5	Basado en coeficientes de riesgo publicados en estudios multicéntricos y meta-análisis (incremento de alrededor del 1,2% de la mortalidad a corto plazo sobre el valor de las GCA).
Guía de calidad del aire (GCA)	50	25	Basado en la relación entre los niveles de MP de 24 horas y anuales.

\* Se prefiere el uso del valor guía del MP2.5 ya que con niveles bajos despiertan menos preocupación las desviaciones episódicas.

\*\* Percentil 99 (3 días/año).

\*\*\* Con fines administrativos. Basado en los valores guía promedio anuales; el número exacto se ha de determinar sobre la base de la distribución de la frecuencia local de las medias diarias. La distribución de la frecuencia de los valores diarios del MP2.5 y el MP10 normalmente se aproxima a una función logarítmica de distribución normal.

Fuente: Cuadro 1 (Pág. 15) y cuadro 2 (Pág. 16) de "Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre Actualización mundial 2005" (World Health Organization 2005).

Las explicaciones de los valores de la Guía están dadas en el mismo documento (World Health Organization 2005):

*“Como valor guía para el MP2.5 en exposiciones prolongadas se eligió una concentración anual media de 10 µg/m<sup>3</sup>. En el estudio de la Sociedad Americana del Cáncer (ACS) ((Pope, Burnett et al. 2002) este valor representa el extremo inferior de la gama en la que se observaron efectos significativos en la supervivencia. La adopción de una guía en este nivel concede un valor importante a los estudios de exposición prolongada que utilizan los datos de la ACS y los de Harvard de seis ciudades (Dockery, Pope III et al. 1993), (Pope, Thun et al. 1995; Pope, Burnett et al. 2002), (Krewski, Burnett et al. 2000), (Jerrett M, RT et al. 2005). En todos estos estudios se notificaron asociaciones estrechas entre la exposición prolongada al MP2.5 y la mortalidad. (...)”*

*“Según los resultados del estudio de Dockery et al. (1993), los riesgos son semejantes en las ciudades con las concentraciones prolongadas más bajas de MP2.5 (es decir, de 11 a 12,5 µg/m<sup>3</sup>). Es manifiesto un mayor riesgo en la ciudad con la segunda concentración media prolongada más baja de MP2.5 (es decir, de 14,9 µg/m<sup>3</sup>), lo que indica que cabe esperar efectos en la salud cuando las concentraciones medias anuales son del orden de 11 a 15 µg/m<sup>3</sup>. Por consiguiente, se puede considerar que, según la bibliografía científica disponible, una concentración media anual de 10 µg/m<sup>3</sup> estaría por debajo de la media para los efectos más probables (...).”*

*Además del valor guía, se definen tres objetivos intermedios ((Morel, Yeh et al. 1999)) para el MP2,5 (véase la tabla anterior). Se ha demostrado que éstos se pueden alcanzar con medidas sucesivas y sostenidas de reducción. Los países pueden encontrar estos valores intermedios particularmente útiles para calcular los progresos con el paso del tiempo en el difícil proceso de reducir constantemente la exposición de la población al MP.*

*Como nivel del OI-1 se eligió una concentración media anual de MP2,5 de 35 µg/m<sup>3</sup>. Este nivel corresponde a las concentraciones medias más elevadas notificadas en estudios sobre los efectos prolongados en la salud y puede reflejar también concentraciones históricas más altas, pero desconocidas, que pueden haber contribuido a los efectos observados en la salud. Se ha demostrado que en el mundo desarrollado este nivel está asociado con una mortalidad elevada.*

*El nivel de protección del OI-2 se establece en 25 µg/m<sup>3</sup> y se basa en los estudios de exposición prolongada y mortalidad. Este valor es superior a la concentración media con la cual se han observado efectos en tales estudios, y probablemente esté asociado con efectos significativos en la salud derivados de exposiciones tanto prolongadas como diarias a MP2,5. El logro de este valor del OI-2 reduciría los riesgos de la exposición prolongada para la salud en alrededor de un 6% (IC del 95%, 2–11%) en relación con el valor del OI-1. El nivel recomendado del OI-3 es de 15 µg/m<sup>3</sup>, concediendo un valor aún mayor a la probabilidad de efectos significativos asociados con la exposición prolongada. Este valor está próximo a las concentraciones medias que se notifican en los estudios de exposición prolongada y determina una reducción adicional en el riesgo de mortalidad del 6% con respecto al valor del OI-2.*

*También se recomiendan las GCA y los objetivos intermedios correspondientes para el MP10. Esto se debe a que un valor guía para el MP2,5 por sí solo no ofrecería*

*protección frente a los efectos perjudiciales del MP grueso (la fracción entre 10 y 2,5  $\mu$ ). Sin embargo, se estima que las pruebas cuantitativas sobre el MP grueso son insuficientes para preparar guías separadas. En cambio, hay abundante bibliografía sobre los efectos de la exposición breve al MP10, que se ha utilizado como base para la formulación de las GCA de la OMS y los objetivos intermedios para las concentraciones de 24 horas de MP. (...)*

*En estudios múltiples realizados en Europa (29 ciudades) y en los Estados Unidos (20 ciudades) se notificaron efectos de mortalidad a corto plazo con MP10 del 0,62% y el 0,46% por 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (media de 24 horas), respectivamente (Samet, Dominici et al. 2000; Katsouyanni K, G et al. 2001). En un meta-análisis de los datos de 29 ciudades situadas fuera de Europa occidental y de América del Norte se observó un efecto de mortalidad del 0,5% por 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  ((Cohen, Anderson et al. 2004)), en realidad muy parecido al obtenido para las ciudades asiáticas (0,49% por 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) (HEI International Scientific Oversight Committee 2004). Estos resultados parecen indicar que los riesgos para la salud asociados con exposiciones breves al MP10 probablemente son semejantes en las ciudades de los países desarrollados y en desarrollo, con un aumento de la mortalidad de alrededor del 0,5% por cada incremento de 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en la concentración diaria.*

*Por consiguiente, cabe suponer que una concentración de 150  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  dará lugar a un incremento aproximado de la mortalidad diaria del 5%, efecto que sería motivo de gran preocupación y para el cual se recomendarían medidas correctoras inmediatas. El nivel del OI-2 de 100  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  estaría asociado con un incremento aproximado de la mortalidad diaria del 2,5% y el nivel del OI-3 con un aumento del 1,2% (cuadro 2). La GCA para el promedio de 24 horas del MP10 es de 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y refleja la relación entre las distribuciones de las medias de 24 horas (y su percentil 99) y el promedio de las concentraciones anuales.”*

## **II.2 Normativa de la Unión Europea**

El proceso de implementación de una normativa para material particulado fino en la Unión Europea se resume en dos reportes o guías: la primera en el año 1999 y su actualización realizada en el año 2008.

### **II.2.1 Guía de 1999**

La Unión Europea dictó la DIRECTIVA 1999/30/CE del Consejo el año 1999 (Unión Europea 1999) relativa a los valores límite de dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno y óxidos de nitrógeno, partículas y plomo en el aire ambiente. En ésta se encuentra normado el PM10, sin embargo, la norma establece que se deben comenzar a medir las PM2.5 para establecer límites de concentración.

Los límites para PM10 se establecieron en 2 fases:

#### **FASE 1**

1. Valor límite diario para la protección de la salud humana es de 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  de PM<sub>10</sub> que no podrán superarse en más de 35 ocasiones por año, con un 50% a la entrada en vigor de la presente Directiva, con una reducción lineal para el 1 de enero de 2001 y a continuación cada 12 meses hasta alcanzar el 0% para el 1 de enero de 2005.
2. Valor límite anual para la protección de la salud humana es de 40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  de PM<sub>10</sub>, 20% a la entrada en vigor de la presente Directiva, una reducción lineal para el 1 de enero de 2001 y a continuación cada 12 meses hasta alcanzar el 0% para el 1 de enero de 2005.

## FASE 2

1. Valor límite diario para la protección de la salud humana es de 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  de PM<sub>10</sub> que no podrán superarse en más de 7 ocasiones por año. Se derivará de los datos y será equivalente al valor límite de la fase 1 (fecha de cumplimiento: 1 de enero de 2010).
2. Valor límite anual para la protección de la salud humana<sup>22</sup> es de 20  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  de PM<sub>10</sub>, 50% el 1 de enero de 2005 y a continuación cada 12 meses en un porcentaje anual idéntico hasta alcanzar el 0% para el 1 de enero de 2010.

### II.2.2 Guía de 2008

En Mayo de 2008, la Comisión de la Comunidad Europea aprueba la nueva Directiva 2008/50/EC del Parlamento Europeo y del Consejo “Ambient Air Quality and Cleaner Air for Europe” la cual establece normar el PM<sub>2.5</sub> de acuerdo a dos criterios: a través de un límite y un objetivo de reducción de exposición de la población (COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES 2005).

Esta nueva directiva mantiene el valor límite diario de 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y anual de 40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para PM<sub>10</sub> que fuera establecido en la guía anterior.

En el Anexo III se detalla el enfoque de esta regulación.

## II.3 Resumen de Normas

Desde que la USEPA dictó la primera norma para PM<sub>2.5</sub> en el mundo en 1996, la han seguido una serie de Estados. En el año 2000 se suman algunos estados de Canadá (Newfoundland y Labrador), luego el estado de California en USA en 2002, y en el año 2003 Australia y Ecuador. La Organización Mundial de la Salud (OMS) dicta un estándar el año 2005, junto con esto México actualiza su norma de 1993 agregando un estándar de PM<sub>2.5</sub> en 2005. La última modificación normativa a PM<sub>2.5</sub> la realizó nuevamente USA el año 2006.

A continuación se resume la normativa internacional para el PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> en la Tabla 0-5.

---

<sup>22</sup> 1 año civil

Tabla 0-5: Resumen normativa internacional para PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>

País	PM10				PM2.5			
	Anual (ug/m3)	Diaria (ug/m3)	Año Dictación	Entrada en Vigencia	Anual (ug/m3)	Diaria (ug/m3)	Año Dictación	Entrada en Vigencia
<b>EE.UU.</b>	50	150	1997		15	65		1997
	Revocada	150	2006		15 <sup>1</sup>	35		2006
<b>California, EE.UU.</b>	20	50	2002	2003	12	35 <sup>2</sup>	2002	2003
<b>Canadá<sup>3</sup></b>						30	2000	2010
<b>Newfoundl y Labrador, Canadá</b>	No hay	50	2004		No hay	25	2004	2004
<b>Australia</b>	No hay	50	1998	2008	8 <sup>4</sup>	25 <sup>4</sup>	2003	2004
<b>Ecuador</b>	50	150		2003	15	65 <sup>5</sup>	2003	2003
<b>México</b>	50	120	2005	2005	15	65	2005	2005
	50	150	2001	2001	15	65	2001	2001
<b>Perú</b>						50	2008 <sup>6</sup>	2010
						25	2008	2014
<b>OMS</b>	20	50		2005	10	25		2005
OI - 1	70	150			35	75		
OI - 2	50	100			25	50		
OI - 3	30	75			15	38		
<b>Unión Europea</b>	40	50	2000	2005	25		2008	2010 - 2015
					20		2008	2020

1 Propuesta US EPA

2 Valor no podrá ser superado más de 2 veces en un año

3 Los NAAQS establecen una norma anual y diaria para PTS de (70 y 120 ug/m3), dictada en 1997

4 Advisory reporting Standards

5 No existe una norma diaria para PM2.5 en California, sin embargo la EPA promulgó una norma diaria de 35ug/m3 para el PM2.5

6 Norma anual de PM2.5 a partir de 2010 será igual a la diaria

Fuente: Elaboración propia

A continuación se presenta el criterio de excedencia a la normativa de material particulado fino utilizado por algunos países de Latinoamérica, Estados Unidos, la comunidad Europea y la OMS.

 Tabla 0-6: Criterio de excedencia normativa de PM<sub>2.5</sub>

País	PM10		PM2.5	
	Anual	Diaria	Anual	Diaria
<b>EE.UU.</b>		P99	Promedio Anual	P98
<b>Ecuador</b>	Promedio Anual	No exceder más de 2 veces en un año	Promedio Anual	
<b>México</b>	Promedio Anual	P98	Promedio Anual	P98
<b>Perú</b>	Promedio Anual	No exceder más de 3 veces en un año		Promedio Anual
<b>OMS</b>	Promedio Anual	p99 <sup>1</sup>	Promedio Anual	p99 <sup>3</sup>
<b>Unión Europea</b>	Promedio Anual	p90 <sup>2</sup>	Promedio Móvil Trianual	

1 No exceder más de 3 veces en un año

2 No exceder más de 35 veces en un año

Fuente: Elaboración propia

### II.3.1 Valores de Normas

De la revisión y análisis de la normativa internacional se puede concluir dos grandes tendencias en la evolución de la normativa del material particulado.

- a) Con respecto al diámetro aerodinámico del material particulado, la tendencia ha sido a normar partículas cada vez más pequeñas. Las medidas originales de “humo ingles” (British Smoke) o partículas totales en suspensión (PTS o TSP) con que se dictaron las primeras normas fueron reemplazadas luego por PM<sub>10</sub> y recientemente, éstas están siendo complementadas por PM<sub>2.5</sub>. En el caso de la USEPA, la norma de PM<sub>10</sub> reemplazó a la de TSP después de 15 años (1972 vs 1987), y ésta fue complementada por la de PM<sub>2.5</sub> luego de 10 años (1997) y recién está siendo reemplazada parcialmente por la de PM<sub>2.5</sub> el año 2006. De esta manera Estados Unidos es el único país, de acuerdo a la información recabada, que ha revocado la normativa anual para PM<sub>10</sub>.
- b) Los niveles normados han ido bajando progresivamente. La Tabla 0-7 resume la tendencia observada para el caso de EEUU.

Tabla 0-7: Resumen normativa de Estados Unidos para PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>

Año	Fracción de MP	Norma Diaria USA (µg/m <sup>3</sup> )	PM <sub>2.5</sub> equivalente <sup>23</sup>
1972	TSP	260	93
1987	PM <sub>10</sub>	150	90
1996	PM <sub>25</sub>	65	65
2006	PM <sub>25</sub>	35	35

Fuente: Elaboración propia

### II.3.2 Plazos de implementación

En el caso de la Normativa de Estados Unidos, la revisión del 2006 de la Norma de Material Particulado restringe la norma de la fracción fina (PM<sub>25</sub>) para 24 horas de 65 microgramos por metro cúbico (µg/m<sup>3</sup>) a 35 (µg/m<sup>3</sup>), y mantiene la norma anual en 15 (µg/m<sup>3</sup>). Además, la norma de 24 horas para MP<sub>10</sub> se ha mantenido en 150 (µg/m<sup>3</sup>), mientras que la norma anual para el mismo contaminante se ha eliminado, por la falta de evidencia relacionando exposición a material particulado grueso con problemas a la salud.

<sup>23</sup> Asumiendo una razón TSP-PM<sub>10</sub> de 0.6 y una razón PM<sub>10</sub>-PM<sub>2.5</sub> de 0.6 (EPA, 1985).

Tabla 0-8: Calendario Aplicación Norma PM<sub>2,5</sub> USEPA

Hito	Normativa	
	1997	2006
Promulgación de la Norma	Julio 1997	Septiembre 2006
Fecha Efectiva de la Norma	Septiembre 1997	18-12-2006
Recomendaciones estatales a EPA	Febrero 2004 (basado en datos de monitoreo 2001-2003)	18-12-2007 (basado en datos de monitoreo 2004-2006)
Firma de Designaciones Finales	Diciembre 2004	18-12-2008
Fecha Efectiva de Designaciones	Abril 2005	Hasta 90 días luego de publicación en Registro Federal
Vencimiento Ejecución Planes Estatales	Abril 2008	3 años luego de fecha efectiva de designaciones
Fecha de Cumplimiento	Abril 2010 (basado en datos de monitoreo 2007-2009)	Hasta 5 años luego de la fecha efectiva de designaciones
Fecha de Cumplimiento con Extensión	Hasta Abril 2015	Hasta 10 años luego de la fecha efectiva de designaciones

Fuente: PM Standards Revision – 2006. Disponible en: <http://www.epa.gov/oar/particlepollution/naaqrev2006.html>

Como se puede apreciar en la Tabla 0-8, la norma se hace efectiva inmediatamente después de ser promulgada, y puede tomar hasta 18 años para que el cumplimiento de ésta sea exigido.

## II.4 Gestión de Episodios Críticos en Estados Unidos

En EEUU, existe un índice de calidad ambiental “AQI” (Air Quality Index) que transforma las concentraciones ambientales de cada contaminante a una escala de 0 a 500, definiendo de esta manera categorías de calidad ambiental asociadas a un mensaje de salud. El AQI es una herramienta que permite reportar al público general la calidad del aire. En la Tabla 0-9 se presentan las distintas categorías definidas de acuerdo a este índice.

Tabla 0-9: Escala índice de Calidad del Aire de Estados Unidos para contaminantes ambientales normados

Escala Índice de Calidad del Aire							Valor Índice	Categorías
O <sub>3</sub> (ppm) 8-horas	O <sub>3</sub> (ppm) 1- hora	24h PM <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	24h PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	8h CO (ppm)	24h SO <sub>2</sub> (ppm)	24h NO <sub>2</sub> (ppm)		
0 – 0.064	-	0 – 54	0 – 15.4	0.0 – 4.4	0 – 0.034	(1)	0 – 50	<b>Buena</b>
0.065 – 0.084	-	55 – 154	15.5 – 40.4	4.5 – 9.4	0.035 – 0.144	(1)	51 – 100	<b>Moderada</b>
0.085 – 0.104	0.125–0.164	155 – 254	40.5 – 65.4	9.5 – 12.4	0.145 – 0.224	(1)	101 – 150	<b>No saludable para grupos sensibles</b>
0.105 – 0.124	0.165 – 0.204	255 – 354	65.5 <sup>3</sup> – 150.4	12.5 – 15.4	0.225 – 0.304	(1)	151 – 200	<b>Poco Saludable</b>
0.125 – 0.374	0.205 – 0.404	355 – 424	150.5 <sup>3</sup> –250.4	15.5 – 30.4	0.605 – 0.804	0.65 – 1.24	201 – 300	<b>Muy Poco Saludable</b>
(2)	0.405 – 0.504	425 – 504	250.5 <sup>3</sup> –350.4	30.5 – 40.4	0.805 – 1.004	1.25 – 1.64	301 – 400	<b>Peligroso</b>
(2)	0.505 – 0.604	505 – 604	350.5 <sup>3</sup> –500.4	40.5 – 50.4	0.805 – 1.004	1.65 – 2.04	401 – 500	
1NO <sub>2</sub> no tiene estándares (NAAQS) de corto plazo y puede generar sólo un AQI común valor AQI sobre 200								
2Los valores para O <sub>3</sub> 8-horasno definen valores de AQI más altos (>=301). AQI igual o mayores son calculados con concentraciones de O <sub>3</sub> – 1hora								

Fuente: 40 CFR Part 58, “Air Quality Index Reporting, Final Rule”, Environmental Protection Agency EPA.

Los grupos sensibles, es decir, aquellos grupos de mayor riesgo frente a la exposición de PM<sub>2.5</sub> con un índice AIQ sobre 100, corresponden a ancianos, niños y personas con enfermedades respiratorias y cardíacas.

Cada categoría del índice de calidad de aire (AQI) está asociada además a una etiqueta que entrega un color identificatorio, como se presenta en la Tabla 0-10.

Tabla 0-10: Valores, categorías y colores asociados al índice de calidad del aire AQI

Valor Índice	Categoría	Color	Propósito
0 – 50	Buena		Transmitir un mensaje positivo sobre la calidad del aire
51 – 100	Moderada		Transmitir el mensaje de que la calidad diaria del aire diaria es aceptable desde la perspectiva de salud pública, pero cada día en este rango podría resultar en un potencial efecto crónico para la salud; para O <sub>3</sub> , transmitir un aviso de salud limitado para las personas extremadamente sensibles
101 – 150	No saludable para grupos sensibles		Aviso de salud para las personas que se encuentran en los grupos sensibles
151 – 200	Poco Saludable		Advertencia de salud de efectos más serios para grupos sensibles y la notificación de posibles efectos para la población en general, cuando proceda
201 – 300	Muy Poco Saludable		Alerta de Salud de efectos más serios para los grupos sensibles y la población en general
301 – 400	Peligroso		Advertencias sanitarias de las condiciones de emergencia

Fuente: [www.airnow.gov](http://www.airnow.gov) basado en “Air Quality Index Reporting, Final Rule”, Environmental Protection Agency EPA.

En la actualidad la EPA está promulgando cambios en los índices AQI, basados en la revisión de los estándares para PM<sub>2.5</sub> (NAAQS), que establecerían por una parte, la relación existente entre el valor de índice igual a 100 y el nivel de norma establecido para el material particulado fino y por otra parte establecería la relación entre las concentraciones ambientales del PM<sub>2.5</sub> y el índice de valores establecidos para toda la escala de valores desde 0 a 500. De esta manera, los cambios propuestos incluyen establecer el valor AQI de 100 en el nivel de norma diaria para el PM<sub>2.5</sub> y el valor de AQI de 50 en el nivel de la norma anual.

A continuación la Tabla 0-11 presenta la escala de índices AQI vigente en la actualidad en Estados Unidos y los cambios propuestos en la revisión.

Tabla 0-11: Escala actual y revisiones propuestas al índice de Calidad del Aire del PM<sub>2.5</sub> en EEUU

Categoría AQI	Valor Índice	24h PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	
		ACTUAL	PROPUESTA
<b>Buena</b>	0 - 50	0 – 15.4	No cambia
<b>Moderada</b>	51 - 100	15.5 – 40.4	15.5 – 35.4
<b>No saludable para grupos sensibles</b>	101 – 150	40.5 – 65.4	35.5 – 55.4
<b>Poco Saludable</b>	151 – 200	65.5 – 150.4	55.5 – 150.4
<b>Muy Poco Saludable</b>	201 – 300	150.5 – 250.4	No cambia
<b>Peligroso</b>	301 – 400	250.5 – 350.4	No cambia
	401 – 500	350.5 - 500	No cambia

Fuente: 40 CFR Part 58, “Air Quality Index Reporting and Significant Harm Level for Fine Particulate Matter”, proposed rule, Environmental Protection Agency EPA. (2008).

El índice AQI de 500 generalmente corresponde a un nivel de daño significativo “Significant harm level” (SHL). El nivel de SHL es fijado en un nivel que representa “peligro inminente y sustancial para la salud o bienestar público” (Environmental Protection Agency 2008). El valor actual de AQI de 500 para PM<sub>10</sub> corresponde a un nivel de concentración promedio de 24 horas igual a 600 (µg/m<sup>3</sup>). Este valor fue establecido en el año 1987, sobre la base del aumento de la mortalidad durante episodios de contaminación de invierno histórica en Londres. Estos episodios se generaron principalmente por las emisiones provenientes de la combustión de carbón durante períodos con una muy baja dispersión atmosférica, en que las concentraciones de PM<sub>10</sub>, medidas por el método de smog británico, estuvieron dentro del rango de 500 y 1000 µg/m<sup>3</sup>.

Este método recoge principalmente partículas finas, es por esto que en el año 1987, cuando se estableció el nivel superior para PM<sub>10</sub>, se generó una opinión generalizada de que el método de medición de los británicos medía PM con un punto de corte de 4.5 micrones. De esta manera, el límite superior del índice (600 µg/m<sup>3</sup>) fue establecido seleccionando el menor valor dentro de las concentraciones dañinas durante los episodios de contaminación de invierno históricos y sumándole un margen de 100 (µg/m<sup>3</sup>) que fue asumido por los reguladores para considerar esta diferencia en la medición.

Para el caso del PM<sub>2.5</sub>, el valor actual del AQI de 500 fue propuesto en 1998 y aceptado en 1999. Debido a que en ese momento había muy pocos datos de monitoreo disponibles, se estableció un valor de AQI de 500 en un nivel de concentración de PM<sub>2.5</sub> igual a 500 (µg/m<sup>3</sup>) (24 horas) asumiendo que las concentraciones obtenidas por el método de Smog británico eran aproximadamente equivalentes a las concentraciones de PM<sub>2.5</sub>.

Para los valores intermedios (150 – 500) la EPA propone concentraciones de PM<sub>2.5</sub> que generalmente reflejen una relación lineal entre el aumento de los valores de índice y el aumento de las concentraciones de PM<sub>2.5</sub>.

## Anexo III. Enfoque de la Regulación de Material Particulado Fino de la Directiva 2008 de la Unión Europea

La nueva directiva de la Comisión de la Unión Europea considera los siguientes valores para la regulación del material fino:

- Valor Límite de Concentración
- Valor Límite de Exposición
- Valor Objetivo (target)
- Meta Nacional de reducción de la Exposición a PM<sub>2.5</sub>

A continuación se explica cada uno de estos valores.

### III.1 Valor Límite de Concentración de PM<sub>2.5</sub>

Valor límite “*Limit Value*”, corresponde al nivel fijado de acuerdo a los conocimientos científicos con respecto al material particulado. Este valor tiene el objetivo de evitar, prevenir o reducir los efectos nocivos para la salud humana y el medio ambiente.

La comisión establece un valor límite de acuerdo a dos fases. En la primera etapa el límite para el PM<sub>2.5</sub> es de 25 µg/m<sup>3</sup>, el cual debe alcanzarse al 1° de Enero del año 2015.

El valor establecido no debe superarse una vez alcanzado.

En la Tabla 0-12: siguiente se resume los límites establecidos en la nueva directiva de la Unión Europea.

Tabla 0-12: Valor Límite de Concentración para PM<sub>2.5</sub> establecido por la Directiva de la Comisión de la Comunidad Europea (valores anuales en µg/m<sup>3</sup>)

Período promedio de	Valor Límite (µg/m <sup>3</sup> )	Margen de Tolerancia	Fecha de Cumplimiento
<b>ETAPA 1</b>			
1 Año	25	20% al 11 de Junio de 2008, disminuyendo el próximo 1° de Enero y cada 12 meses, en porcentajes anuales iguales para alcanzar 0% al 1° de Enero 2015	1° de Enero 2015
<b>ETAPA 2</b>			
1 Año	20		1° de Enero 2020

Fuente: Directiva 2008/50/EC del Parlamento Europeo y del Consejo “Ambient Air Quality and Cleaner Air for Europe”, 21 Mayo 2008

El valor límite indicado para la etapa 2 será revisado por la Comisión el año 2013 de acuerdo a la nueva información con respecto a los efectos en salud y en el medio ambiente, factibilidad técnica y experiencia con respecto al valor establecido.

### **III.2 Valor Límite de Exposición**

El valor límite de exposición “*Exposure concentration obligation*” corresponde al nivel de exposición máximo permitido para PM<sub>2.5</sub> con el objetivo de reducir los efectos nocivos a la salud humana.

La comisión establece un valor límite de exposición de 20 µg/m<sup>3</sup> de promedio tri – anual a cumplirse el año 2015 para el promedio tri – anual

### **III.3 Valor Objetivo**

Valor fijado con el fin de evitar, prevenir o reducir los efectos nocivos para la salud y el medio ambiente en su conjunto. La directiva establece que los Estados Miembros deben tomar todas las medidas necesarias, siempre que los costos no sean desproporcionados, para asegurar que las concentraciones en el aire de PM<sub>2.5</sub> no excedan este valor.

El valor objetivo “*Target Value*” considerado por la Comisión es de 25 µg/m<sup>3</sup>, el cual debe cumplirse el 1° de Enero de 2010.

### **III.4 Meta Nacional de reducción de la Exposición a PM<sub>2.5</sub>**

Meta Nacional de reducción a la exposición “*National exposure reduction target*” se refiere a la reducción porcentual de la exposición promedio de la población de un Estado miembro. El objetivo de esta meta es reducir los efectos nocivos de la salud humana.

Los Estados Miembros deben tomar todas las medidas necesarias, siempre y cuando los costos no sean desproporcionados, para reducir la exposición de PM<sub>2.5</sub> con el objetivo de alcanzar la meta nacional de reducción a la exposición. Esta meta se calcula en relación al indicador de exposición media (AEI)<sup>24</sup> del año 2010.

La Tabla 0-13 siguiente resume la meta nacional de reducción para PM<sub>2.5</sub> establecida por la Directiva de la Comisión de la Comunidad Europea.

---

<sup>24</sup> AEI: Average Exposure Indicator, basado en el promedio de mediciones de zonas y aglomeraciones urbanas de todo el territorio de un Estado miembro

Tabla 0-13: Meta Nacional de reducción para PM<sub>2.5</sub> establecido por la Directiva de la Comisión de la Comunidad Europea

Meta Nacional de Reducción a la Exposición		Año de cumplimiento
Concentración Inicial (ug/m3)	Meta de Reducción (%)	2020
AEI ≤ 8.5	0%	
8.5 < AEI ≤ 13	10%	
13 < AEI ≤ 18	15%	
18 < AEI ≤ 22	20%	
22 < AEI	Todas las medidas apropiadas para alcanzar 18 ug/m3	

Fuente: Directiva 2008/50/EC del Parlamento Europeo y del Consejo “Ambient Air Quality and Cleaner Air for Europe”, 21 Mayo 2008

La combinación de valor límite concentración y objetivo de reducción de exposición es muy interesante, ya que reconoce que no existiendo un nivel seguro de concentraciones (o al menos, el nivel es muy bajo, en este caso, aceptado implícitamente en 8.5 µg/m<sup>3</sup>) se debe apuntar a una reducción constante de los niveles de PM<sub>2.5</sub>, pero con un esfuerzo máximo de 20% en 10 años.

## Anexo IV. Información de Calidad del Aire en Chile

Se requieren las concentraciones diarias de contaminantes, para estimar los efectos de salud resultantes de una exposición de corto plazo, y el promedio anual de concentraciones, para estimar los efectos resultantes de la exposición de largo plazo.

### IV.1 Análisis estadístico de concentraciones ambientales por ciudad

Debido al proceso físico que controla los niveles ambientales de material particulado, existe una relación entre el promedio anual y el percentil 98 de las concentraciones de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ . Esto implica que el cumplimiento de la norma anual y la norma diaria estén relacionados. De esta manera, la relación que existe entre estos dos estadígrafos (media y percentil 98) es el parámetro fundamental del análisis, que se define de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\beta_{ij} = \frac{P98_{ij}}{\mu_{ij}}$$

Ec 0-1

Donde:

$P98_{ij}$  = Percentil 98 de las concentraciones monitoreadas el año i para la ciudad j

$\mu_{ij}$  = Media de las concentraciones monitoreadas el año i para la ciudad j

Por otra parte, la relación entre ambas fracciones ( $PM_{2.5}$  y  $PM_{10}$ ) está dada por su composición elemental. Para términos del análisis, esta relación se modeló, de manera más simple, a través de la razón entre la concentración de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ .

Para el caso diario, se consideran los percentiles 98 de las concentraciones de  $PM_{2.5}$  y  $PM_{10}$ , para el caso anual se estima a partir de la media de las concentraciones, de acuerdo a la siguiente metodología.

$$\alpha_{diarioij} = \frac{P98_{PM2.5ij}}{P98_{PM10ij}}$$

Ec 0-2

$$\alpha_{anualij} = \frac{\mu_{PM2.5ij}}{\mu_{PM10ij}}$$

Ec 0-3

Donde:

$P_{98PM_{2.5}}$  = Percentil 98 de las concentraciones de  $PM_{2.5}$  monitoreadas el año  $i$  para la ciudad  $j$

$P_{98PM_{10}}$  = Percentil 98 de las concentraciones de  $PM_{10}$  monitoreadas el año  $i$  para la ciudad  $j$

$\mu_{PM_{2.5}}$  = Media de las concentraciones de  $PM_{2.5}$  monitoreadas el año  $i$  para la ciudad  $j$

$\mu_{PM_{10}}$  = Media de las concentraciones de  $PM_{10}$  monitoreadas el año  $i$  para la ciudad  $j$

## Anexo V. Análisis de Sensibilidad

### 8.1 Imputación de concentraciones a ciudades sin datos

La información de concentraciones no se encuentra disponible para todas las ciudades analizadas en el estudio. Para completar la información faltante se aplicó la metodología descrita en las secciones 3.1 y 3.2. De acuerdo con esto, se desarrolló el análisis de costo y beneficios considerando dos escenarios:

1. Se completa la información de concentraciones para las ciudades sin datos
2. Se realiza el análisis considerando sólo las ciudades con información disponible

Los resultados de este análisis se presentan a continuación:

Tabla 0-14: Valor presente de los costos y beneficios (percentil 50) (MUS\$) por período para escenarios modelados

Alternativa Norma	Indicador	Concentraciones Imputadas	Concentraciones Datos disponibles
<b>Base</b>	VP Beneficios	45,200	42,600
	VP Costos	11,300	11,300
<b>Alternativa 1</b>	VP Beneficios	54,900	51,200
	VP Costos	23,600	23,600
<b>Alternativa 2</b>	VP Beneficios	52,600	49,500
	VP Costos	20,000	20,000
<b>Alternativa 3</b>	VP Beneficios	49,700	47,100
	VP Costos	15,600	15,600
<b>Alternativa 4</b>	VP Beneficios	45,100	43,100
	VP Costos	11,200	11,200

Nota: Valor Presente calculado para los distintos períodos, con una tasa de descuento de 8% anual. Tipo Cambio 640 CLP/USD.

Fuente: Elaboración propia.

Se puede apreciar de la tabla anterior que para el percentil 50 de las distribuciones de probabilidad de costos y beneficios, ambos casos analizados no presentan grandes diferencias, siendo esta menor al 7%.

Tabla 0-15 Beneficio Neto en sus percentiles 10, 50 y 90 para ambos escenarios analizados

Alternativa	Concentraciones Imputadas	Concentraciones Datos disponibles
<b>PERCENTIL 10</b>		
Base	8,570	7,410
Alternativa 1	-5	-2,120
Alternativa 2	3,010	1,250
Alternativa 3	6,020	4,890
Alternativa 4	8,710	7,770
<b>PERCENTIL 50</b>		
Base	33,700	30,900
Alternativa 1	30,600	27,200
Alternativa 2	32,000	28,900
Alternativa 3	33,500	31,200
Alternativa 4	33,500	31,600
<b>PERCENTIL 90</b>		
Base	58,700	54,500
Alternativa 1	61,700	55,900
Alternativa 2	61,700	56,600
Alternativa 3	61,100	57,300
Alternativa 4	58,500	55,400

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la Tabla 0-15 los beneficios netos para el percentil 90 varían en menos de un 8%. Para el percentil 50 la diferencia es menor al 11%. Sólo para el percentil 10 el beneficio neto presenta diferencias mayores, siendo la alternativa 1 la que presenta la mayor diferencia la cual es bastante significativa. De lo cual se puede concluir que al considerar las ciudades con datos disponibles en el análisis el beneficio neto aumenta.

Cabe destacar entonces la importancia de realizar un mayor número de campañas de monitoreo en las localidades sin información que permitirían completar el análisis y determinar si otras ciudades no monitoreadas actualmente presentan problemas de contaminación relevantes.

## Anexo VI. Proyección de emisiones y concentraciones

### VI.1 Relación entre emisiones y concentraciones

Para estimar los cambios en las concentraciones ambientales se requiere conocer la relación que existe entre las emisiones de un contaminante y la concentración que esta genera en el ambiente. La estimación precisa de esta relación requiere de un modelo que incorpore las reacciones químicas que ocurren en la atmósfera de modo de incorporar el material particulado secundario, modelo que actualmente no está disponible para ninguna de las ciudades de estudio. Debido a esta limitación, se usan modelos simplificados que permiten calcular aproximadamente la relación entre las emisiones y las concentraciones ambientales.

La metodología utilizada consiste en un modelo del tipo *rollback* simple, en el que se supone una relación lineal entre las emisiones de un contaminante y la concentración que genera, lo que permite construir los factores emisión-concentración (FEC) utilizando la siguiente ecuación:

$$FEC_i^t = \left( \frac{\partial C_i^t}{\partial E^t} \right)^{-1} \approx \frac{E_i^t}{C^t} \quad \text{Ec 0-4}$$

Donde:

- $FEC_i^t$ : Factor emisión-concentración en el monitor  $i$  en el año  $t$  [(ton/año)( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )]
- $C_i^t$ : Concentración ambiental de contaminante correspondiente al emitido (eventualmente secundario), en el monitor  $i$  para el año  $t$  [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]
- $E_i^t$ : Emisión de contaminante para el año  $t$  [ton]

En rigor, lo que interesa es la sensibilidad de las concentraciones ambientales frente a cambios en las emisiones, evaluado en un punto cercano a las condiciones actuales. Como esto no es posible, aproximamos esta relación según el cociente entre el total de emisiones  $E_i^t$  y la concentración ambiental del contaminante  $C_i^t$ .

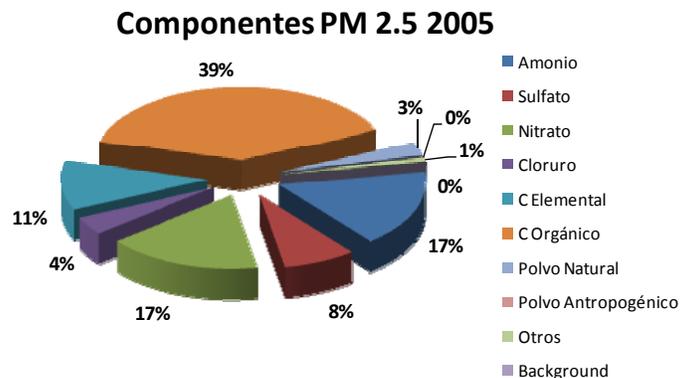
El total de emisiones provino de los inventarios de emisiones de cada ciudad presentados previamente. Por otra parte, para considerar el impacto en la formación del material particulado secundario las emisiones de los diferentes precursores se relacionan con la fracción correspondiente del material particulado secundario obtenido a partir de los estudios de los filtros de los monitores en distintas estaciones como muestra la Figura 0-1 (los valores presentados en la figura son valores promedio para todo el año), de acuerdo a la metodología que se describe a continuación:

$$C_{ij} = CT_i * F_{ij} \quad \text{Ec 0-5}$$

Donde:

- $C_{ij}$ : Concentración ambiental de contaminante  $i$  en forma del componente elemental  $j$  [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]
- $CT_i$ : Concentración ambiental total del contaminante  $i$  [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]
- $F_{ij}$ : Fracción del componente elemental  $j$  en el análisis de los filtros del contaminante  $i$  [%]
- $i$ :  $\text{PM}_{2.5}$ ,  $\text{PM}_{10}$
- $j$ : Amonio, Sulfato, Nitrato, Cloruro, C Elemental, C Orgánico, Polvo Natural, Polvo Antropogénico, Otros, Background

Figura 0-1: Fracción de componentes elementales del material particulado fino 2005



Fuente: Comunicación personal, Roberto Martínez, CONAMA, 20 de marzo de 2007

Debe tenerse en cuenta que el análisis de filtros sólo se encuentra disponible para Santiago.

Para las otras localidades se tuvo que extrapolar la información proveniente de Santiago. De esta forma, se asumió para la ciudad de Concepción una distribución de las fracciones de componentes elementales similar a la de Santiago. En el caso de Temuco, de acuerdo a lo señalado en el AGIES del PDA de Temuco y Padre Las Casas y en el respectivo Anteproyecto, se consideró que no hay aporte de  $\text{PM}_{10}$  y  $\text{PM}_{2.5}$  asociado a contaminantes secundarios. Para Tocopilla, en esta localidad el 50% del material particulado fino corresponde a sulfatos, y se supuso que no hay aporte de amonio. Con estos supuestos se normalizaron los datos de Santiago manteniendo la misma proporción de fracciones para el resto de los componentes.

Fue necesario distinguir entre los aportes de los contaminantes primarios a las distintas fracciones del MP, es decir, al material particulado fino o  $\text{PM}_{2.5}$  y al material particulado grueso, denominado aquí PMc (“c” por *coarse*, del inglés; correspondiente al material particulado grueso, entre 10 y 2,5 micrones), para lo cual se supusieron las relaciones que se presentan en la Tabla 0-16.

Estas relaciones suponen que todo el  $MP_{2.5}$  emitido por las fuentes genera un aporte a las concentraciones ambientales sólo como  $MP_{2.5}$ , así como todos los contaminantes secundarios formados a partir de gases ( $NH_3$ ,  $SO_2$  y  $NO_x$ ). Por su parte, solamente la emisión directa de  $PM_c$  genera un aporte a la concentración de  $PM_c$ .

Tabla 0-16: Relaciones consideradas entre los contaminantes primarios y secundarios

Contaminante emitido por las fuente	Componente correspondiente en filtro	Aporta como fracción
$NH_3$	Amonio	Fina ( $PM_{2.5}$ )
$SO_2$	Sulfato	Fina ( $PM_{2.5}$ )
$NO_x$	Nitrato	Fina ( $PM_{2.5}$ )
$PM_{2,5}$	Carbono elemental + Carbono orgánico	Fina ( $PM_{2.5}$ )
<b><math>PM_c</math></b>	<b>Polvo Antropogénico</b>	<b>Gruesa (<math>PM_c</math>)</b>

Fuente: Elaboración propia

Fue necesario suponer lo anterior para hacer operativo el modelo simplificado de emisión-concentración, y tiene sentido físico dado que en las transformaciones químicas que sufren en la atmósfera contaminantes primarios como  $NO_x$ ,  $SO_2$  y  $NH_3$  principalmente se forma material particulado fino.

En la Figura 0-1 se ha identificado una fracción de componente elemental asociado a background. Entendiendo la concentración background como aquella que no se puede controlar aplicando medidas dentro de una determinada zona de influencia. Se ha considerado background también, al aporte asociado a todos los componentes elementales para los cuales no se ha identificado un contaminante asociado emitido por alguna fuente. De esta forma, se consideró background total a los aportes asociados a los siguientes componentes elementales: cloruro, polvo natural, otros y background.

Finalmente, en la Tabla 0-17 se entregan los FEC determinados para cada una de las localidades analizadas en el estudio.

Tabla 0-17: Factores Emisión-Concentración (FEC) para PM<sub>2.5</sub> utilizados en el presente estudio ((ton/año)/(μg/m<sup>3</sup>))

Ciudad	PM <sub>2.5</sub>	SO <sub>x</sub>	NO <sub>x</sub>	PRS
Calama	2.160	86.100	866	71.700
Tocopilla	32	11.000	3.530	0
Región 05-All	892	46.200	2.950	50.200
Gran Valparaíso	98	1.300	1.610	59.100
Ventanas	35	16.800	824	840
Región 06-All	919	57.500	2.700	48.000
Gran Concepción	1.080	7.170	2.250	6.250
Gran Temuco	125	0	0	10.100

Fuente: Elaboración propia

## VI.2 Proyección de Concentraciones Ambientales

Para realizar la proyección de concentraciones ambientales se estima primero un cambio en las emisiones. Con ello, y en base a los FEC del modelo *rollback*, se proyecta la evolución de las concentraciones.

## Anexo VII. Impactos en salud de la contaminación atmosférica por material particulado

Múltiples estudios nacionales e internacionales han mostrado que existe asociación entre el nivel de concentración de ciertos contaminantes, la incidencia de muertes y la incidencia de varias enfermedades cardiorrespiratorias, tanto en niños como en adultos, además de otros efectos como días de restricción de actividad y pérdida de días de trabajo, entre otros.

Los principales contaminantes asociados a efectos en salud son el material particulado (PM) y el ozono. Los efectos de PM y ozono se consideran generalmente independientes, aunque la evaluación de las sinergias entre ambos es un tema aun pendiente.

La Tabla 0-18 muestra algunos de los efectos a la salud para los que se considera existe asociación con el nivel de contaminación atmosférica.

Tabla 0-18: Efectos en la salud que han sido relacionados con la contaminación atmosférica

Efectos asociados con evidencia científica suficiente	Efectos asociados sin evidencia científica suficiente
Mortalidad (adultos mayores)	Inducción de asma
Mortalidad (infantil)	Efectos de desarrollo fetales / neonatales
Mortalidad neonatal	Mayor sensibilidad de vías respiratorias
Bronquitis – crónica y aguda	Enfermedades respiratorias crónicas no bronquitis
Ataques de asma	Cáncer
Admisiones hospitalarias respiratorias	Cáncer pulmonar
Admisiones hospitalarias cardiovasculares	Efectos conductuales (Ej., dificultades de aprendizaje)
Visitas a sala de urgencia	Desordenes neurológicos
Enfermedades respiratorias inferiores	Exacerbación de alergias
Enfermedades respiratorias superiores	Alteración de mecanismos de defensa
Síntomas respiratorios	Daño a células respiratorias
Días de ausentismo laboral y escolar	Menor tiempo de desarrollo de angina
Días con actividad restringida	Cambios morfológicos en el pulmón
Irritación de ojos	Arritmia cardiovascular

Fuente: (EPA 1999a)

### VII.1 Efectos del Material Particulado

Dentro del material particulado, la fracción más fina (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> e incluso más pequeñas, como sulfatos) ha sido consistentemente asociada a impactos en salud. Aunque los mecanismos fisiológicos de los efectos de PM<sub>10</sub> aun no son comprendidos cabalmente, cientos de estudios epidemiológicos realizados en diferentes partes del mundo han mostrado efectos en poblaciones diversas y en diferentes grupos de edad. Una revisión exhaustiva se encuentra en el documento

de Criterios de la USEPA (EPA 2004), y en otros estudios recientes (NRC 2004; AIRNET 2005).

Uno de los principales aspectos del efecto del material particulado en la salud es que hasta ahora no se ha detectado un nivel bajo el cual estos efectos no se manifiesten, es decir, no se ha detectado un nivel umbral. Debido a que ha sido imposible encontrar este nivel seguro, la OMS no ha propuesto ninguna guía específica para PM<sub>10</sub>. Sin embargo, sí se han observado efectos a niveles muy bajos.

Existe también evidencia de que los estratos socio-económicos más bajos son más susceptibles a los efectos del material particulado<sup>25</sup>. En nuestro país también se han encontrado efectos más importantes en los estratos con nivel menor de educación<sup>26</sup>.

## VII.2 Estudios epidemiológicos

En Latinoamérica se han desarrollado muchos estudios que han cuantificado el impacto de la contaminación, principalmente de PM, en la salud. La Organización panamericana de la Salud acaba de publicar recientemente un documento de revisión de estos estudios (PAHO 2005).

La mayoría de los estudios se han realizado en tres países, Brasil, Chile y México, y principalmente en las capitales de ellos. El efecto más estudiado ha sido la mortalidad prematura, aunque también se han estudiado visitas a salas de emergencia, admisiones hospitalarias, visitas a consultorios externos y signos y síntomas de morbilidad, además de cambios morfológicos e histopatológicos.

En el 6.1 se presenta un resumen de estudios epidemiológicos de efectos en la salud relacionados con la contaminación atmosférica en Latinoamérica y el Caribe.

Los resultados reportados por los estudios que han cuantificado cambios son comparables a los reportados en la literatura internacional. Por ejemplo, para mortalidad por todas las causas, el meta-análisis de 5 estudios latinoamericanos reporta un aumento de riesgo de 0.61 (0.16-1.07) %

---

<sup>25</sup> O'Neill, M. S., M. Jerrett, et al. (2003). "Health, wealth, and air pollution: advancing theory and methods." *Environ Health Perspect* **111**(16): 1861-70.

, Bell, M. L., M. S. O'Neill, et al. (2005). "International Symposium on Socioeconomic Factors and Air Pollution Health Effects." *Environmental Science and Technology* **accepted**.

<sup>26</sup> Cifuentes, Vega et al. 1999

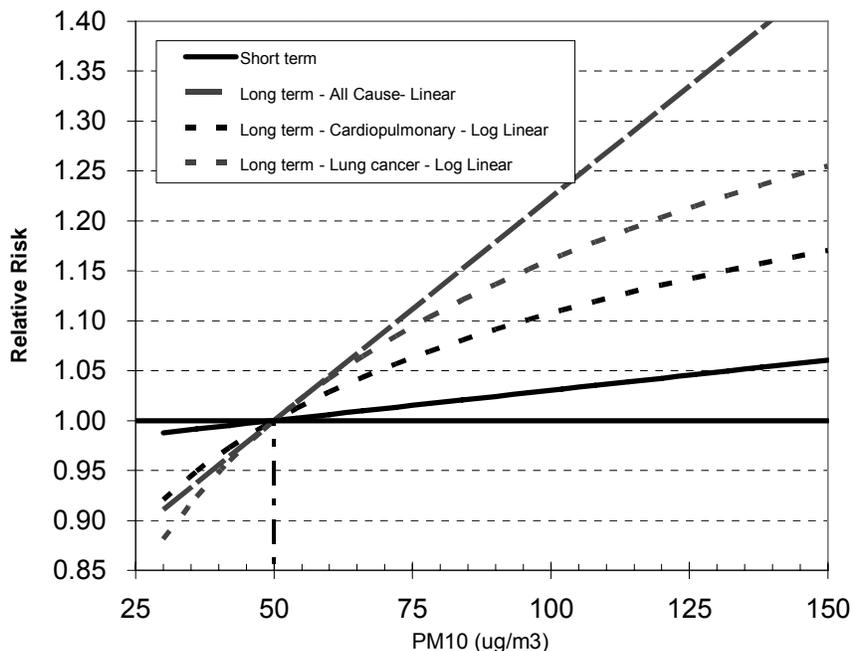
por cada  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de  $\text{PM}_{10}$ , lo que están dentro del rango de estimaciones totales similar al de Europa, aunque algo mayor que el reportado para Asia (0.49, 0.23-0.76)%, (HEI 2004). Para personas mayores de 65 años, el riesgo aumenta a 0.89 (0.46-1.24) %.(PAHO, 2005, Cuadro 2-14).

El hecho de que los resultados de los estudios latinoamericanos estén en línea con los resultados de estudios de diversas partes del mundo nos permite extrapolar los resultados para algunos efectos no estudiados en Latinoamérica con cierta tranquilidad. El caso más importante de esta extrapolación es la mortalidad prematura por exposición crónica al material particulado. Este efecto solo se puede estudiar a través de estudios de largo plazo, generalmente de cohorte, que son difíciles y caros de realizar, por lo que sólo se han realizado en Estados Unidos. El estudio más importante de este tipo es el llevado a cabo usando la cohorte de datos de la Sociedad Americana del Cáncer (American Cancer Society, ACS). Estos datos han sido analizados y reanalizados por varios equipos de investigadores (Pope, Thun et al. 1995; Pope, Burnett et al. 2002; Pope, Burnett et al. 2004), proporcionando los resultados más sólidos hasta el momento.

El análisis de estos datos muestra algunos antecedentes que son importantes para la cuantificación de los impactos en salud:

- Para concentraciones bajas, el impacto de la exposición de largo plazo a la contaminación atmosférica puede ser mucho mayor que el impacto de la exposición de corto plazo.
- Para cuantificaciones a concentraciones altas, es necesario considerar una forma funcional logarítmica para la relación concentración-respuesta, como la mostrada en la Figura 0-2. De otro modo, la extrapolación a concentraciones altas produce resultados no confiables.
- El análisis de los resultados según nivel educacional muestra claramente que los impactos son mayores en aquellos grupos con menor educación, para todos los efectos considerados, como se resume en la Tabla 0-19.

Figura 0-2: Curvas concentración-respuesta para mortalidad resultante de exposiciones de corto y largo plazo



Notas: se observa que para formas lineales, la curva de exposición de largo plazo tiene una pendiente aproximadamente 5 veces mayor que la de corto plazo. Esta diferencia se hace casi nula para cambios porcentuales pequeños cuando se comparan las curvas logarítmicas con la curva de corto plazo.

Fuente: Cifuentes en base a Cohen et al 2004

Tabla 0-19: Riesgo relativo según nivel educacional de acuerdo al re-análisis del estudio de la ACS (por cada 10µg/m<sup>3</sup> de aumento de PM<sub>10</sub>, adultos mayores de 30 años)

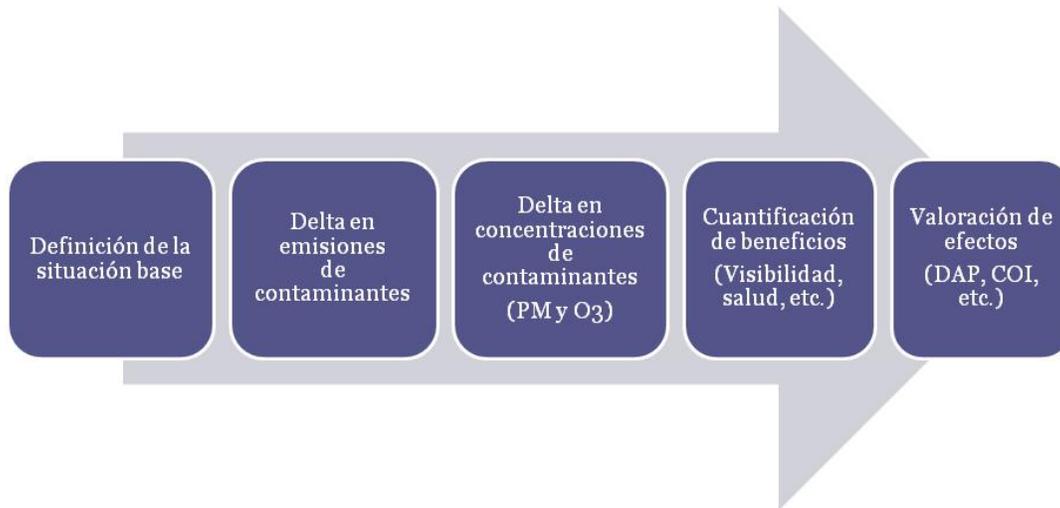
Causa mortalidad	Nivel educacional		
	Menos de High School	High School	Más de High School
Mortalidad todas las causas	1.13 (1.07-1.2)	1.09 (1.03-1.15)	1.02 (0.71-1.07)
Enfermedad cardiorrespiratoria	1.17 (1.08-1.27)	1.13 (1.04-1.22)	1.05 (0.8-1.13)
Enfermedad cardiovascular	1.17 (1.07-1.28)	1.14 (1.05-1.25)	1.09 (1.02-1.17)
Enfermedad respiratoria	1.13 (0.48-1.41)	1.06 (0.62-1.31)	0.65 (0.2-1.01)
Cáncer al Pulmón	1.15 (0.94-1.4)	1.14 (0.77-1.37)	0.65 (0.23-0.71)

Fuente: Estudio ACS, re-análisis (Krewski 2003)

## Anexo VIII. Metodología para estimación de riesgos y beneficios

La metodología aplicada en el estudio se basa en el modelo de función de daño (utilizado ampliamente para evaluar medidas que impliquen beneficios ambientales). La Figura 0-3 muestra las etapas consideradas en la modelación.

Figura 0-3: Esquema Metodológico del análisis



Fuente: Elaboración propia

El análisis consiste en las siguientes etapas:

1. Estimación de los impactos de la situación sin norma (situación base)
2. Estimación de los impactos en la situación en que se cumple con niveles alternativos de la norma anual y diaria.

En la primera parte determinamos los impactos que tendría la situación actual en las diferentes ciudades si no se tomase ninguna medida para controlar las concentraciones (situación base). En este caso las concentraciones, en general, aumentan.

En la segunda parte se determinan los impactos resultantes de una situación en que las concentraciones ambientales satisfacen los diferentes niveles propuestos para las normas, y el nivel de la norma de PM10 actual, que se toma como base para comparar las alternativas.

Para estimar los cambios en la incidencia de un determinado efecto en la salud, resultante de un cambio en las concentraciones ambientales de un contaminante determinado, se requieren los siguientes datos:

1. Datos de calidad del aire. Se requieren las concentraciones diarias de contaminantes, para estimar los efectos de salud resultantes de una exposición de corto plazo, y el promedio anual de concentraciones, para estimar los efectos resultantes de la exposición de largo plazo
2. Funciones concentración-respuesta. Representan la relación entre los niveles de contaminación y la incidencia del efecto en la salud. Idealmente, estas funciones se deben haber estimado en el mismo lugar para el cual se realiza el análisis, pero a falta de ellas, es posible incorporar funciones estimadas en otras partes, aunque con un aumento en la incertidumbre de las estimaciones<sup>27</sup>.
3. Tasa de incidencia de efectos y población expuesta. Como la mayoría de las funciones C-R entregan el cambio porcentual en la incidencia de los efectos, es necesario conocer el número de efectos que ocurren en la población expuesta, el que se calcula como la tasa de incidencia (efectos por unidad de población) por la población expuesta<sup>28</sup>. Al igual que para las funciones C-R, para la tasa de incidencia es preferible el uso de datos locales, pero a falta de estos se pueden usar tasas de otros lugares, aunque nuevamente, a costa de un aumento en la incertidumbre de las estimaciones<sup>29</sup>. El dato de población, por supuesto, debe ser local.

## VIII.1 Evaluaciones de impacto en la Salud

El impacto de la contaminación atmosférica en la salud de la población es importante. Gracias a la creciente disponibilidad de estadísticas de salud, recientemente se han realizado varios estudios de Evaluaciones de Impacto de Salud, EIS (Health Impact Assessment, HIA en inglés) que han mostrado la magnitud de los impactos. La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha mostrado en una reciente publicación (Cohen et al 2005) que a nivel mundial, aproximadamente el 3% de la mortalidad cardiopulmonar, el 5% de la mortalidad de cáncer respiratorio, y el 1% de la mortalidad infantil (de menos de 5 años) debido a infecciones respiratorias agudas son atribuibles a los niveles actuales de contaminación atmosférica. Esto resulta en aproximadamente 800.000 muertes anuales en exceso (el 1.2% de las muertes totales), de las cuales la mayoría ocurre en países en desarrollo.

---

<sup>27</sup> Esta situación debe ser analizada caso a caso, ya que algunos efectos se encuentran profundamente estudiados en muchas ciudades del mundo, y pudiese existir sólo un estudio local. En ese caso, no es tan claro cuál de las dos estimaciones – la local o la transferida de otros lugares – es más incierta.

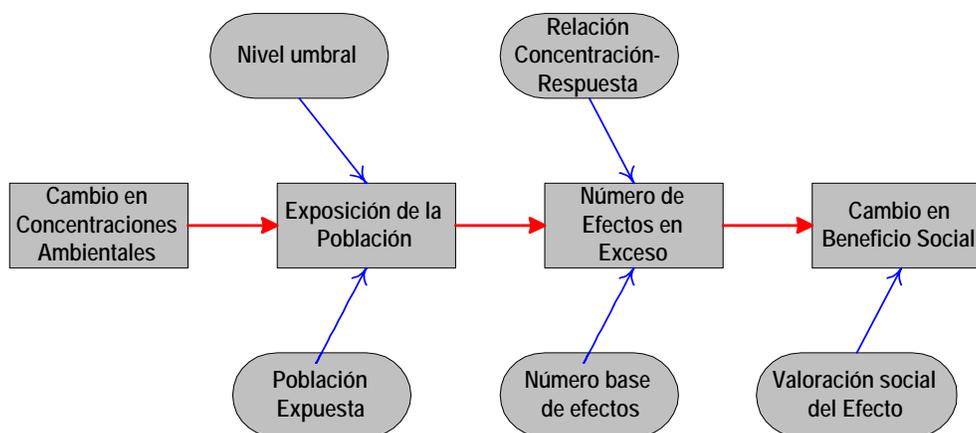
<sup>28</sup> También se puede usar directamente el número de efectos por año, si estuviera disponible. Sin embargo, para la proyección de los efectos en el tiempo, es más recomendable usar la tasa multiplicada por la población.

<sup>29</sup> En general los datos para los principales efectos, como mortalidad y admisiones hospitalarias, se encuentran disponibles para todas las comunas de Chile, pero algunos efectos, como los días de pérdida de trabajo se encuentran disponibles sólo a nivel nacional. Algunos efectos poco estudiados, como la ocurrencia de días con actividad restringida, no tienen ninguna estimación nacional, por lo que es necesario usar datos del lugar de origen del estudio, la mayoría de las veces, EE.UU.

### VIII.1.1 El método de la función de daño

Para poder llevar a cabo una evaluación económica de los impactos en salud, es necesario en primer lugar cuantificar la magnitud de estos impactos en función de la variación en los niveles de contaminación existentes. Para llevar a cabo este paso, en este estudio se utiliza el método conocido como la función de daño que se resume la Figura 0-4:

Figura 0-4: Esquema del método de la función de daño



Fuente: Elaborado en base a (Cifuentes, Krupnick et al. 2005)

La función de daño comprende una secuencia de dos o más modelos interrelacionados. En primer lugar se dispone de un modelo que estima los cambios en emisiones producto de cambios en el nivel de actividad de las fuentes, seguido de un modelo que vincula los cambios en la concentración de contaminantes con cambios en la incidencia de efectos nocivos sobre la salud de la población. Estos modelos reciben el nombre de **funciones dosis – respuesta o concentración-respuesta (CR)**<sup>30</sup>.

### VIII.1.2 Funciones Concentración-Respuesta

El análisis de riesgo y su posterior valoración descansa en las funciones Concentración-Respuesta (C-R) que relacionan la incidencia de determinados efectos en salud con los niveles de concentración ambiental de los contaminantes en estudio. El modelo de análisis de riesgo combina la información de los niveles de concentración con datos de incidencia de efectos y de población expuesta para estimar el número de casos anuales que son atribuibles a la contaminación atmosférica.

30 También se usa el nombre de exposición-respuesta. Sin embargo, creemos que el nombre concentración-respuesta es más adecuado dado el uso actual que se hace de ellos.

Las funciones se obtienen, en su mayoría, de estudios epidemiológicos de series de tiempo, de cohorte, o de sección transversal<sup>31</sup>. Los primeros consisten en observar los cambios temporales (generalmente diarios) en la incidencia de efectos en una población (por lo general, una ciudad o comunidad completa) y relacionarlo estadísticamente con los cambios en los niveles de contaminantes. Como la población es la misma, esta actúa como su propio control estadístico. Los mayores efectos de confusión son, en este caso, variables ambientales como temperatura y humedad que al igual que la contaminación, varían en forma diaria.

Los estudios de sección transversal estiman una relación funcional entre la incidencia de un cierto efecto a la salud en un área metropolitana y diversas variables propias del área en cuestión, incluyendo la concentración de contaminantes. Esto se realiza analizando en forma conjunta muchas áreas metropolitanas a la vez. Estos estudios pueden entregar una estimación de efectos de largo plazo, pero son mucho más sensibles el efecto de variables de confusión, por lo que su uso no es tan extendido.

Los estudios de cohorte toman una muestra de individuos, generalmente seleccionada de manera aleatoria, y monitorean su estado de salud durante períodos largos de tiempo (diez o más años), relacionándolo con características de los individuos y con variables ambientales. De esta manera, estiman el efecto que exposiciones de mediano y largo plazo a la contaminación tienen sobre la salud de los individuos. Estos estudios requieren una gran cantidad de recursos, por lo que se han realizado muy pocos, todos ellos en los Estados Unidos.

La mayoría de las funciones C-R son del tipo “riesgo relativo”, estiman el cambio en efectos relativo a una situación considerada como base, generalmente, la tasa de incidencia del efecto observada en la población de análisis. El cambio en el efecto que una población determinada experimenta, producto de cambios del nivel de concentración de un contaminante queda dada como:

$$\Delta E_{ij}^k = F(Pop_j^k, IR_{ij}, \beta_{ij}^k, \Delta C^k) \quad \text{Ec 0-6}$$

Donde

- $Pop_j^k$  es el número de personas del grupo j que está expuesta al contaminante k.
- $IR_{ij}$  es la tasa incidencia del endpoint<sup>32</sup> i en la población j.

---

<sup>31</sup> Para un listado detallado de estudios desarrollados en Chile y Latinoamérica en general, ver 0: “Resumen estudios epidemiológicos en Latinoamérica, (PAHO, 2005).

<sup>32</sup> En la literatura los efectos a la salud estudiados son llamados “endpoints”. Los endpoints relacionados con la contaminación atmosférica pueden ser clasificados en cuatro categorías: muerte prematura; acciones médicas, como hospitalizaciones; enfermedades propiamente tales y restricción de actividad (incluyendo días perdidos de trabajo). Pueden ser también clasificados según la naturaleza de sus efectos, en crónicos y agudos; y según sus causas de acuerdo a “The International Classification of Diseases 9th Revision ICD9 [The international classification of diseases 9th revision](#)”

- $\beta_{ij}^k$  es el riesgo unitario de que el endpoint i afecte una subpoblación j producto de un contaminante k.
- $\Delta C^k$  es el cambio de concentración en el contaminante k.

Esto puede ser reescrito como.

$$\Delta E_{ij}^k = F((Pop_j^k * IF_{ij}^k(IR_{ij}, \beta_{ij}^k)), \Delta C^k) \quad \text{Ec 0-7}$$

Donde  $IF_{ij}^k(IR_{ij}, \beta_{ij}^k)$  es el factor de impacto del endpoint i en la población j producto de un nivel de contaminación k, que incorpora el riesgo unitario  $\beta_{ij}^k$  y la tasa de incidencia  $IR_{ij}$  del efecto.

De acuerdo a esto, los efectos a la salud son cuantificados considerando tres dimensiones principales: (i) efecto analizado (ii) subpoblación estudiada y (iii) contaminante específico asociado<sup>33</sup>.

La Tabla 0-20 muestra un resumen de endpoints clasificados como cuantificables según el estudio considerando la información disponible.

---

“

<sup>33</sup> Ver Anexo 1: “Estudios epidemiológicos en Latinoamérica (PAHO, 2005)”.

Tabla 0-20: Efectos en la salud cuantificables relacionados con la contaminación atmosférica

Exposición	Tipo de endpoint / Exposición Largo Plazo (LP) - Exposición Corto Plazo (CP)	Endpoint (causa específica)	PM10 - Ciudad/ país donde se obtuvieron las funciones C-R	O3 - Ciudad/ país donde se obtuvieron las funciones C-R	
Largo Plazo	Muerte prematura (LP)	Todas las causas Enfermedad cardiopulmonar Cáncer al pulmón	USA USA USA		
	Enfermedad (LP)	Bronquitis crónica	USA		
Corto Plazo	Muerte prematura (CP)	Mortalidad todas las causas Causas respiratorias Causas cardiorespiratorias	Several LA cities / USA USA USA	Santiago Mexico City Mexico City	
	Acciones médicas (CP)	Admisiones hospitalarias (CP)	Enfermedad cardiovascular	USA	Sao Paulo
			Asma	USA	
			Desorden pulmonar crónico obstructivo	USA	Sao Paulo
		Visitas a la sala de emergencias (CP)	Aritmia	USA	
			Enfermedad isquémica al corazón	Sao Paulo	Sao Paulo
			Causas respiratorias	Sao Paulo/USA	Sao Paulo
	Visitas médicas (CP)	Pneumonia	Pneumonia	Sao Paulo/USA	Sao Paulo
			Asma(ICD9 493)	Sao Paulo	Mexico City
			Enfermedad isquémica al corazón	Sao Paulo	
Causas respiratorias			Santiago	Mexico City	
Enfermedad (CP)	Pneumonia and Influenza	Pneumonia	USA	Sao Paulo	
		Enfermedades respiratorias bajas-RSP	Santiago	Santiago	
		Síntomas respiratorios altos- RSP	Santiago	Santiago	
Días de actividad restringida (CP)	Síntomas respiratorios bajos -RSP	Enfermedades respiratorias bajas-RSP	Mexico City	Mexico City	
		Asma (ICD9)	Mexico City	Mexico City	
		Ataques asmáticos	USA		
		Bronquitis aguda	USA		
Días de actividad restringida (CP)	Días perdidos de trabajo (WLD)	Días de actividad restringida (RAD)	USA		
		Días de actividad menor restringida (MRAD)	USA		
		Días con falta de aire	USA		
			USA		

Fuente: basado en (Cifuentes, Krupnick et al. 2005) y en [PAHO, 2005]

### VIII.1.3 Agregación de efectos

Al utilizar la clasificación propuesta en “The International Classification of Diseases 9th Revision (ICD9)”, se debe considerar que algunos de los endpoints son incluidos en varios grupos de forma repetida. Es por esto, que debe tenerse mucho cuidado a la hora de sumarlos en la etapa de agregación de beneficios para evitar problemas de doble conteo. Por ejemplo, las admisiones al hospital por neumonía (ICD 480-487) están incluidas dentro del grupo admisiones al hospital por problemas respiratorios (ICD 460- 519); por consiguiente; ambos grupos no pueden ser sumados directamente.

### VIII.1.4 Valoración de efectos en salud

Una vez cuantificada la magnitud de los impactos en salud es necesario llevar estos valores a términos monetarios para poder utilizarlos en un análisis costo beneficio. Los impactos económicos de menores efectos en la salud producto de la contaminación del aire incluyen tres niveles: (i) costo de tratamiento, (ii) productividad perdida y (iii) pérdida de bienestar.

El valor monetario de efectos a la salud puede ser estimado de dos formas:(1) a través de medidas del costo que incluyen el tratamiento de la enfermedad y pérdida de productividad por días no trabajados (método COI, de su sigla en inglés “Cost of illness”) (2) a través de medidas de la

disposición a pagar de los individuos por disminuir riesgos a su salud, que incluyen los niveles valorizados por el método COI más la pérdida de bienestar que implica estar enfermo (WTP, de su sigla en inglés “Willingness to pay”).

Para un análisis completo de los beneficios sociales que genera la reducción del nivel de contaminación del aire es necesario disponer de un valor monetario para cada uno de los efectos a la salud cuyo cambio puede ser cuantificado. Idealmente, valores de WTP son las mejores aproximaciones de los beneficios totales de mejoras en la calidad del aire en el bienestar de las personas. Desafortunadamente, estos valores no se encuentran generalmente disponibles para el caso chileno, por lo que en estos casos, valores basados en el método COI serán utilizados.

Otra opción es transferir valores desde otros contextos (WTP o COI transferidos) reescalando valores unitarios obtenidos en USA para representar la realidad de nuestro país. Basándose en la información recabada en el estudio (Cifuentes, Krupnick et al. 2005) fue posible identificar el total de los endpoints cuantificables que es posible valorizar. Se incluye en el Anexo VIII (ver Tabla 0-22 y Tabla 0-23) el listado de valores recopilados en dicho estudio, tanto COI como WTP, según endpoint y grupo etéreo; y un listado de valores transferidos.

La Tabla 0-21 muestra un resumen de endpoints clasificados como valorizables que serán considerados en la evaluación costo beneficio.

Tabla 0-21: Efectos en la salud valorizables relacionados con la contaminación atmosférica

Efectos a la salud		*Disponibility of values (WTP, COI) / Local (L) or Transferred (T)				
Tipo de endpoints	Endpoint (causa específica)	All	Children	Adult	Elder	
<b>Muerte Prematura</b>	Todas las causas	WTP (L)				
<b>Enfermedad</b>	Bronquitis crónica	WTP (T)				
<b>Acciones Médicas</b>	<b>Admisiones hospitalarias</b>	Enfermedad cardiovascular (ICD9 390-429)	WTP (T)			
		Asma	WTP (T)			
		Aritmia (ICD9 427)	COI			COI
		COPD (ICD 490-496)	WTP (T)			
		Causas respiratorias (ICD9 460-519)	COI			COI
		Enfermedad isquémica al corazón (ICD9 390-429)	WTP (T)			
	<b>Visitas a la sala de emergencia</b>	Pneumonia (ICD9 480-487)	WTP (T)			
		Asma (ICD9 493)	WTP (T)			
		Causas respiratorias (ICD9 460-519)	WTP (T)			
		Pneumonia (ICD9 480-486)	COI			COI
<b>Visitas médicas</b>	Enfermedades respiratorias bajas-RSP	COI	WTP (T)			
	Síntomas respiratorios altos- RSP (ICD9 460, 465, 487)	COI	WTP (T)		COI	
<b>Enfermedad</b>	Síntomas respiratorios bajos -RSP (ICD9 460, 465, 487)		COI			
	Enfermedades respiratorias bajas-RSP		COI			
<b>Días de actividad restringida (RAD)</b>	Ataques asmáticos	COI	WTP (T)	WTP (T)		
	Bronquitis aguda	WTP (T)				
	Días de trabajo perdido (WLD)	COI				
	Días de actividad restringida (RAD)	WTP (T)				
	Días de actividad menor restringida (MRAD)	WTP (T)				
	Días con falta de aire	WTP (T)				

\* Se privilegiará la disponibilidad de valoraciones de la disposición al pago (WTP) de los individuos, ya sea local o transferida.

Fuente: Elaborado en base a (Cifuentes, Krupnick et al. 2005)

### VIII.1.4.1 Transferencia de valores de WTP

Como se observa claramente en las tablas anteriores no es posible disponer de valores estimados en Chile para cada uno de los endpoints estudiados, y para algunos endpoints específicos ni siquiera es posible disponer de valores estimados en Latinoamérica. En estos casos es necesario transferir valores desde otras ciudades o países, usando la siguiente ecuación:

$$WTP_{Chile} = WTP_{PaísBase} * (IPC_{Chile} / IPC_{PaísBase})^{\eta} \text{ Ec 0-8}$$

Donde IPC es el ingreso per cápita del país correspondiente y  $\eta$  es la elasticidad de la demanda con respecto al ingreso por salud. La hipótesis subyacente en el método de transferencia de beneficios es que las diferencias en valoración pueden ser explicadas principalmente debido a diferencias en ingresos entre ambos países.

Una elasticidad de 1 significaría que los valores de WTP transferidos son proporcionales a las diferencias en ingreso, mientras que una elasticidad de 0 implicaría que la demanda por salud no depende del ingreso; por lo que los valores de WTP transferidos serían los mismos para la ciudad analizada que para la ciudad base. Estudios de disposición al pago han estimado la elasticidad de la demanda con respecto al ingreso en un rango que va desde 0.2 a valores mayores a 2 (Alberini, Cropper et al. 1997).

Tabla 0-22: Valores unitarios de WTP transferidos de estudios en Latinoamérica (US\$ per 1000 \$IPC)

Endpoint	Age Group	Latin-American Studies		
		Mid	Number of studies	Range
<b>Reductions in Risk of Death</b>				
Statistical Life	All	96.465	2	64172 to 128757
<b>Chronic Illness</b>				
Chronic Bronchitis	All	9.263	2	3551 to 14975
<b>Hospital Admissions</b>				
Pneumonia (ICD 480-487)	All	30,6	2	19 to 42
COPD (ICD 490-496)	All	30,6	2	19 to 42
Asthma (ICD 493)	All	30,6	2	19 to 42
CVD (ICD 390-429)	All	30,6	2	19 to 42
Congestive Heart Failure (ICD 428)	All	30,6	2	19 to 42
Ischemic Heart Failure (ICD 410-414)	All	30,6	2	19 to 42
<b>Emergency Room Visits</b>				
Respiratory (ICD 460-519)	All	15,8	2	10 to 22
Asthma (ICD 493)	All	15,8	2	10 to 22
<b>Illness</b>				
Asthma Attacks	Adult	1,9	1	-
<b>Restriction in Activity</b>				
Restricted Activity Days	All	5,0	extrap.	-
Minor Restricted Activity Days	Adult	2,6	2	2.54 to 2.66

Nota: Mid corresponde al valor medio de los endpoints valorizados

### VIII.1.4.2 Transferencia de costos médicos

Información de valores COI puede ser transferida de ser necesario. A continuación se presentan los resultados obtenidos en (Cifuentes, Krupnick et al. 2005).

Tabla 0-23: Valores de costos médicos basados en estimaciones COI para Latinoamérica (US\$ per caso para PPPI de \$1000)

Endpoint	Age Group	Number of estimates	Average	Mid	Range	Uncertain Distribution
<b>Hospital Costs</b>						
Chronic Bronchitis	All	3	609,4	251,3	19 to 1558	Triangular( 19, 251, 1558)
<b>Hospital Admissions</b>						
Respiratory ( ICD 460-519)	All	3	164,4	137,1	137 to 192	Triangular( 137, 137, 192)
	Elder	1	137,1			
Pneumonia (ICD 480-487)	All	3	281,6	185,3	137 to 522	Triangular( 137, 185, 522)
	Elder	1	137,1			
COPD (ICD 490-496)	All	2	1.037,6		517 to 1558	Uniform( 517, 1558)
Asthma (ICD 493)	Adult	1	137,1			
	All	3	201,2	137,1	53 to 414	Triangular( 53, 137, 414)
	Children	1	137,1			
Cardiovascular disease (ICD 390-429)	All	4	592,1	724,1	308 to 956	Triangular( 308, 724, 956)
	Elder	1	307,9			
Congestive Heart Failure (ICD 428)	All	1	1.167,3			
	Elder	1	164,1			
Ischemic Heart Failure (ICD 410-414)	All	1	744,3			
Dysrhythmias (ICD 427)	All	1	307,9			
	Elder	1	307,9			
<b>Emergency Room Visits</b>						
Respiratory ( ICD 460-519)	All	3	12,6	8,0	6 to 24	Triangular( 6, 8, 24)
Pneumonia (ICD 480-486)	All	1	6,1			
	Elder	1	6,1			
Upper respiratory symptoms (ICD 460, 465, 487)	All	1	6,1			
	Elder	1	6,1			
Asthma (ICD 493)	Adult	1	6,1			
	All	3	15,6	12,8	6 to 28	Triangular( 6, 13, 28)
	Children	1	6,1			
<b>Medical Visits</b>						
Lower respiratory symptoms	Children	1	4,1			
Upper respiratory symptoms	Children	1	4,1			
<b>Illness and Symptoms</b>						
Asthma Attacks	All	1	29,6			
Respiratory Symptoms	All	1	0,9			

Fuente: Elaborado en base a (Cifuentes, Krupnick et al. 2005)

### VIII.1.4.3 Productividad Perdida

Valores para la productividad perdida son computados a través del promedio de días perdidos de trabajo producto de ocurrencia de un evento por el salario promedio diario de la ciudad. Los días de trabajo perdido son representados principalmente con el periodo en que el individuo se ve obligado a permanecer hospitalizado. Probablemente individuos que requieren un periodo de hospital requerirán un periodo de convalecencia, aumentando su productividad perdida. Como esta información no estaba disponible en (Cifuentes, Krupnick et al. 2005) se asumió un periodo de convalecencia de la mitad del periodo de hospitalización. A continuación se presentan las estimaciones presentadas en dicho estudio.

Tabla 0-24: Duración promedio de enfermedades clasificadas en la categoría de admisiones hospitalarias (días por caso)

Endpoint	Santiago			
	All	Children	Adult	Elder
Chronic Bronchitis			10yr	10yr
<i>Hospital Admissions</i>				
CVD (ICD 390-429)	8,4	8,1	8,2	9,3
Congestive Heart Failure				
AMI				
Dysrhythmias (ICD 427)	6,8		6,8	9,3
RSP (ICD 460-519)	8,8	8,2	8,9	9,0
Pneumonia (ICD 480-487)	6,9		6,9	11,6
Asthma (ICD 493)	6,8	5,3	7,3	6,7
COPD				

(\*) Corresponds to total disability period, not only hospital stay

Sources:

Santiago: averages from the whole country, from the 1996 Hospital Discharges database from the Ministry of Health computed in Cifuentes, 2001.

### VIII.1.5 Valoración de Beneficios

Finalmente para calcular el beneficio social de las reducciones de emisiones, se requiere el beneficio social de la reducción de concentraciones ambientales de PM<sub>2.5</sub>, que corresponde a los costos evitados por la exposición a una menor concentración de PM<sub>2.5</sub>. En un estudio reciente, uno de los autores actualizó los beneficios sociales para 39 ciudades de Latinoamérica, entre las que se encontraba Santiago. Los valores se calcularon para dos escenarios de funciones de daño y de valoración: escenario alto y escenario bajo.

Los valores marginales, en dólares por  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  de PM<sub>2.5</sub> de promedio anual reducidos se presentan en la siguiente tabla, para valores basados en disposición al pago (WTP) y costo de la enfermedad (COI). Estos valores incluyen, para el caso de COI, el tratamiento de la enfermedad y pérdida de productividad por días no trabajados y para el caso de WTP, la disposición a pagar de los individuos por disminuir riesgos a su salud, que incluyen los niveles valorizados por el método COI más la pérdida de bienestar que implica estar enfermo.

Tabla 0-25: Beneficios unitarios estimados para 2009 (US\$/Persona\*  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  PM2.5)

Escenario	Valor (US\$/persona * $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
Bajo	7
Alto	33

**Fuente: Dictuc (2009)**

Estos beneficios corresponden a los valores actualizados por Dictuc (2009) de los beneficios estimados por Cifuentes et al (2005) y son los utilizados para calcular los beneficios sociales de la reducción de emisiones obtenidas.

Los valores presentados en la tabla son valores promedio para todo el año. En las situaciones de emergencia, los valores son proporcionalmente mayores. Los valores fueron proyectados en el tiempo usando la variación del Ingreso per Cápita (en dólares o pesos reales).

## Anexo IX. Metodología de estimación de Costos

Para la realización de un AGIES, la estimación de los costos sociales es una tarea fundamental debido a que todo nuevo procedimiento, medida o ley que se implemente generará perjuicios para algún sector de la sociedad, por lo que es necesario identificar, cuantificar y valorizarlos.

En el presente proyecto, los costos asociados a la implementación de la norma de PM<sub>2.5</sub> son producto de las medidas de abatimiento de contaminantes que es necesario aplicar sobre las fuentes emisoras para llegar a los límites de concentración que la norma está proponiendo.

La metodología para las curvas se basó en los siguientes pasos:

- a. Identificación y clasificación de las fuentes emisoras por ciudad
- b. Asignación de medidas de mitigación para cada tipo de fuente
- c. Cálculo de reducción de emisiones y concentraciones
- d. Cálculo de las Curvas de Costos
- e. Análisis distributivo de los Costos

### IX.1 Identificación y clasificación de fuentes

La realización de curvas de costos para una determinada ciudad depende exclusivamente de la existencia y nivel de detalle del inventario de emisión. En otras palabras resulta imposible asignar una medida de mitigación, y por lo tanto su consecuente reducción en concentración, de una fuente que no esté bien determinada.

Con este criterio en consideración, la Tabla 0-26 resume las ciudades y zonas en donde fue posible la estimación de costos.

Tabla 0-26: Inventarios ocupados en el estudio

Zona	Tipos de Fuente	Fuente	Año Inventario
Tocopilla	FF, FM, FFug	DICTUC 2006	2005
Calama	FF, FM, FFug	DICTUC 2008	2006
Ventanas	FF, FM, FFug	DICTUC 2008	2006
V Región	FF, FM	CENMA 2001	2000
VI Región	FF, FM	DICTUC (2007), SECTRA_PACIN III (2006)	2010
Gran Temuco	FF, FM, FFug	DICTUC (2008)	2010
Gran Concepción	FF, FM	DICTUC (2007), SECTRA PACIN III (2006)	2005, 2000
Gran Santiago	FF, FM, FFug	DICTUC (2007)	2005

Fuente: Elaboración propia

- FF: Fuentes Fijas
- FM: Fuentes Móviles
- FFug: Fuentes Fugitivas

La descripción de cada una de estas fuentes se detalla a continuación.

Tabla 0-27 Clasificación Tipos de Fuentes Inventarios de Emisiones

Tipo de Fuente	Clasificación	Fuentes
<b>Fuentes Fijas</b>	Industrial	Combustión externa e interna (Calderas, grupos electrógenos, entre otros), Evaporativas (fábricas, industrias químicas, entre otros) y Procesos (industrias metalúrgicas, celulosa, alimentos, entre otros)
	Residenciales	Combustión residencial de Kerosene y GLP
	Comerciales	Restaurant, asadurías
	Otras Fuentes Fijas	Incendios urbanos , Incendios Forestales, cigarrillos, rellenos sanitarios, Quemaz Agrícolas
<b>Fuentes Móviles</b>	En Ruta	Buses, Camiones, vehículos, motocicletas
	Fuera de Ruta	Aeropuertos, máquinas agrícolas, de construcción y puertos
<b>Fuentes Fugitivas</b>	Construcción y Demolición	Construcción de Edificios y Caminos
	Polvo Resuspendido	Calles pavimentadas y no pavimentadas
	Preparación de Terrenos Agrícolas	

Fuente: Elaboración propia a partir de DICTUC, SECTRA, CENMA

## IX.2 Asignación de medidas por fuente

A cada una de las fuentes identificadas y clasificadas según inventarios se le asignaron las medidas de mitigación correspondiente a sus características y contaminante emitido. Se utilizaron para ello: los AGIES<sup>34</sup> de planes de descontaminación de la Región Metropolitana, Temuco, Tocopilla y Calama, los cuales cuentan con 17 medidas para fuentes móviles, 10 medidas para fuentes fijas y 2 medidas para fuentes fugitivas y *Air Control Net Documentation Report* (costo-efectividad para PM10, PM2.5, NOx, NH<sub>3</sub>, SOx) desarrollado para la Agencia Ambiental de EE.UU. (US-EPA) para el análisis de regulación en calidad del aire en Mayo 2006, considerando sólo aquellas medidas que eran aplicables a la realidad chilena. (53 medidas para Fuentes fijas). El total de medidas consideradas se detallan en la memoria de cálculo del Anexo XV.

En las tablas siguientes se realizó un resumen de las medidas más importantes<sup>35</sup> y fuente emisora a la cual es aplicada.

<sup>34</sup> AGIES anteriores entregados por CONAMA al consultor

<sup>35</sup> La importancia de las medidas se basó en el criterio de máxima reducción promedio, es decir, reducción dividida por el número de ciudades analizadas donde se aplicó dicha medida

Tabla 0-28: Medida aplicada por fuente emisora: Fuentes Móviles<sup>36</sup>

N°	Nombre medida	Fuente a la que se aplica	Referencia	Red. Promedio (µg/m <sup>3</sup> )
1	Incentivos Camiones en Flota	FM: Camiones	AGIES PPDA RM	0.19
2	Norma ASM	FM: Vehículos livianos	AGIES PPDA RM	0.12
3	Maquinaria Fuera de Ruta	FM: fuera de ruta	AGIES PPDA RM	0.05
4	Restricción Vehicular Gasolina	FM: Vehículos livianos	AGIES PPDA RM	0.01
5	Buses Nueva Norma EIV from all	FM: Buses	AGIES PPDA RM	0.01
6	Calidad Combustible Diesel	Todo FM	AGIES PPDA RM	0.00
7	Calidad Combustible Gasolina	Todo FM	AGIES PPDA RM	0.00
8	Nueva Norma Gasolina	FM: Vehículos livianos	AGIES PPDA RM	0.00
9	Restricción Vehicular Diesel	FM: Vehículos livianos	AGIES PPDA RM	0.00

Fuente: Elaboración Propia

<sup>36</sup> La Reducción Promedio representa el promedio de reducciones de PM<sub>2.5</sub> para las ciudades donde esa medida fue aplicada. Además, los valores para Red. Promedio = 0.00 µg/m<sup>3</sup> representa una reducción nula de concentraciones para el número de cifras significativas considerada, distinto a un valor de 0 µg/m<sup>3</sup> de manera absoluta. Como se trata de una tabla agregada nacional, esto quiere decir que el orden y la magnitud de las reducciones cambie significativamente entre las ciudades a nivel nacional.

Tabla 0-29: Medida aplicada por fuente emisora: Fuentes Fijas<sup>37</sup>

Nº	Nombre medida	Fuente a la que se aplica	Referencia	Red. Promedio (µg/m <sup>3</sup> )
1	Dry ESP-Wire Plate Type	FF industriales: procesos minerales y metalúrgicos	AirControlNet	2.60
2	Education and Advisory Program	FF residencial: leña	AirControlNet	2.48
3	Chemical Additives to Waste	FF: crianza de animales	AirControlNet	1.55
4	Control de la calidad de la leña	FF residenciales: leña	GAC	1.44
5	Recambio de estufas	FF residenciales: leña	GAC	0.89
6	CEM Upgrade and Increased Monitoring .Frequency of PM Controls	FF industriales: procesos minerales y metalúrgicos	AirControlNet	0.62
7	Norma SO <sub>2</sub> (30 ng/J)	FF industriales: calderas diesel	AGIES PPDA RM	0.57
8	Fabric Filter (Pulse Jet Type)	FF industriales: procesos minerales y metalúrgicos; alimentos y agropecuaria	AirControlNet	0.57
9	Compensación de emisiones	FF residencial: combustión externa	GAC	0.54
10	Increased Monitoring Frequency (IMF) of PM .Controls	FF industriales: procesos minerales y metalúrgicos	AirControlNet	0.53
11	Low NO <sub>x</sub> Burner	FF industriales: procesos minerales y metalúrgicos	AirControlNet	0.26
12	Aislación de Casas	FF residencial	GAC	0.22
13	Oxygen Trim + Water Injection	FF industrial y residencial: calderas	AirControlNet	0.20
14	Prohibición de chimeneas	FF residencial: leña	GAC	0.18
15	Fabric Filter (Mech. Shaker Type)	FF industriales: procesos minerales y metalúrgicos	AirControlNet	0.13
16	Ultra Low NO <sub>x</sub> Burner	FF industriales: procesos minerales y metalúrgicos	AirControlNet	0.11
17	Cullet Preheat	FF industriales: procesos minerales y metalúrgicos	AirControlNet	0.11
18	Selective Non-Catalytic Reduction (SNCR) Urea .Based	FF industriales: procesos minerales y metalúrgicos	AirControlNet	0.10
19	Dust Control Plan	FF industrial: acopio	AirControlNet	0.10
20	Meta 2010 NO <sub>x</sub>	FF: quemas	AGIES PPDA RM	0.09
21	Mid-Kiln Firing	FF industriales: procesos minerales y metalúrgicos	AirControlNet	0.09
22	Catalytic Oxidizer	FF comerciales: restaurant	AirControlNet	0.07

<sup>37</sup> La Reducción Promedio representa el promedio de reducciones de PM<sub>2.5</sub> para las ciudades donde esa medida fue aplicada. Además, los valores para Red. Promedio = 0.00 µg/m<sup>3</sup> representa una reducción nula de concentraciones para el número de cifras significativas considerada, distinto a un valor de 0 µg/m<sup>3</sup> de manera absoluta. Como se trata de una tabla agregada nacional, esto quiere decir que el orden y la magnitud de las reducciones cambie significativamente entre las ciudades a nivel nacional.

23	Selective Catalytic Reduction (SCR)	FF industriales: procesos minerales y metalúrgico /residenciales: combustión externa	AirControlNet	0.06
----	-------------------------------------	--	---------------	------

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 0-30: Medida aplicada por fuente emisora: Fuentes Fugitivas

N°	Nombre medida	Fuente a la que se aplica	Referencia	Red. Promedio (µg/m3)
1	Pavimentación	FFug: calles no pavimentadas	DICTUC S.A.	0.39
2	Humedecer terreno	FFug: terrenos agrícolas, construcción y .demolición	Minera Escondida	0.03
3	PAC	FFug: calles pavimentadas	AGIES PPDA RM	0.02
4	Encapsulamiento acopio (barreras de viento)	FFug: construcción y demolición	DSS	0.00

Fuente: Elaboración Propia

### IX.3 Reducción de emisiones y concentraciones

Con la asignación de medidas por fuente emisora y las eficiencias de las mismas, se calcula la reducción de contaminantes. Para las fuentes que es posible aplicarles más de una medida, fue necesario hacer un análisis más detallado con respecto a las más óptimas en cuanto a eficiencia-costo.

La emisión efectiva de una fuente  $i$  con la aplicación de  $N$  medidas queda expresada en la Ecuación 1 y la reducción final de las medidas en la Ecuación 2.

$$ECM_i = ESM_i \cdot \prod_{k=1}^N (1 - \eta_{k,i}) \quad \text{Ecuación 1}$$

$$\Delta E_i^N = ESM_i - ECM_i = ESM_i \cdot \left( 1 - \prod_{k=1}^{N-1} (1 - \eta_{k,i}) \right) \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

- $ECM_i$ : Emisión de la fuente  $i$  con todas las medidas aplicables
- $ESM_i$ : Emisión de la fuente  $i$  sin medidas
- $\eta_{k,i}$ : Eficiencia de la medida  $k$  para la fuente emisora  $i$
- $\Delta E_i^N$ : Reducción de emisiones aplicando  $N$  medidas para la fuente  $i$

Con el cálculo de las reducciones ( $\Delta E_i^N$  (ton/año)) es posible estimar la reducción en concentración anual de  $PM_{2.5}$  a través de los Factores de Emisión-Concentración (FEC), los cuales representan la cantidad de contaminante que es necesario emitir (en ton/año) para aumentar en  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  el promedio anual de  $PM_{2.5}$ .

Con la información de las concentraciones y proyecciones de emisiones de cada ciudad se determinaron sus FEC para un año determinado, y con el supuesto de que éstos se mantienen constantes, es posible calcular las concentraciones para años futuros. Los FEC han sido detallados en la Tabla 0-46.

## IX.4 Curvas de Costo

Para estimar los costos sociales de alcanzar la nueva norma finalmente se construyeron las curvas de costo: Costo total vs  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  de  $PM_{2.5}$  reducido. Esta curva entrega el mínimo costo total para cada nivel de reducción.

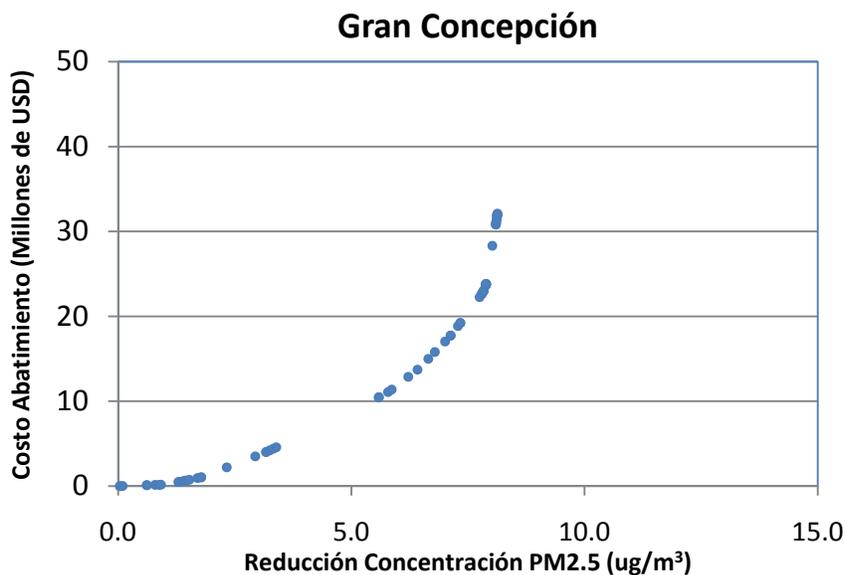
La cantidad de medidas que es posible aplicar a las fuentes emisoras transforma el cálculo de estas curvas en un problema complejo.

Para cada una de las fuentes y medidas posibles, se calculó su costo medio  $CMe$  (US\$/Ton de  $PM_{2.5}$  reducido), los cuales fueron ordenados de manera creciente con el fin de determinar las mejores medidas en cuanto a costo-efectividad (en otras palabras, se asignaron las medidas partiendo por las más baratas por  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  reducido)). Con este orden nos aseguramos que para cada reducción en concentración obtendremos el costo total mínimo para alcanzarla.

Debido a que sólo se tuvo disponibilidad de pocos inventarios de emisiones, en las ciudades que carecían de éstos se realizó una asignación directa de curvas de costos de otras ciudades o zonas con características similares, tales como geográficas, demográficas, climáticas, etc.

En la Figura 0-5 se muestra la curva de costos totales para el caso de Concepción para el año 2012, la cual fue modelada utilizando el inventario de emisiones ajustado al año en cuestión y mediante la aplicación de más de 20 medidas para las distintas fuentes emisoras.

Figura 0-5: Curva de Costos para Concepción en el año 2012



Fuente: Elaboración propia

Luego de obtenidas las curvas de costo para las distintas ciudades, estas se ajustaron a un polinomio cúbico de acuerdo a la Ecuación 3. La Tabla 0-31 muestra los resultados del ajuste de curvas cúbicas para cada una de las ciudades señaladas en la Tabla 4-8 (Las curvas de costo por ciudad se pueden apreciar en la Figura 0-10 de los anexos), mientras que la

Figura 0-6 muestra los costos totales para todas las ciudades, lo que nos permite comparar las ciudades donde es más costo-efectivo reducir la concentraciones de PM<sub>2.5</sub>.

$$CT = a \cdot red^3$$

Ecuación 3

Donde:

- *CT*: Costo Total de Abatimiento (US\$)
- *a*: Coeficiente de ajuste polinomio cúbico
- *red*: Reducción de PM<sub>2.5</sub> (µg/m<sup>3</sup>)

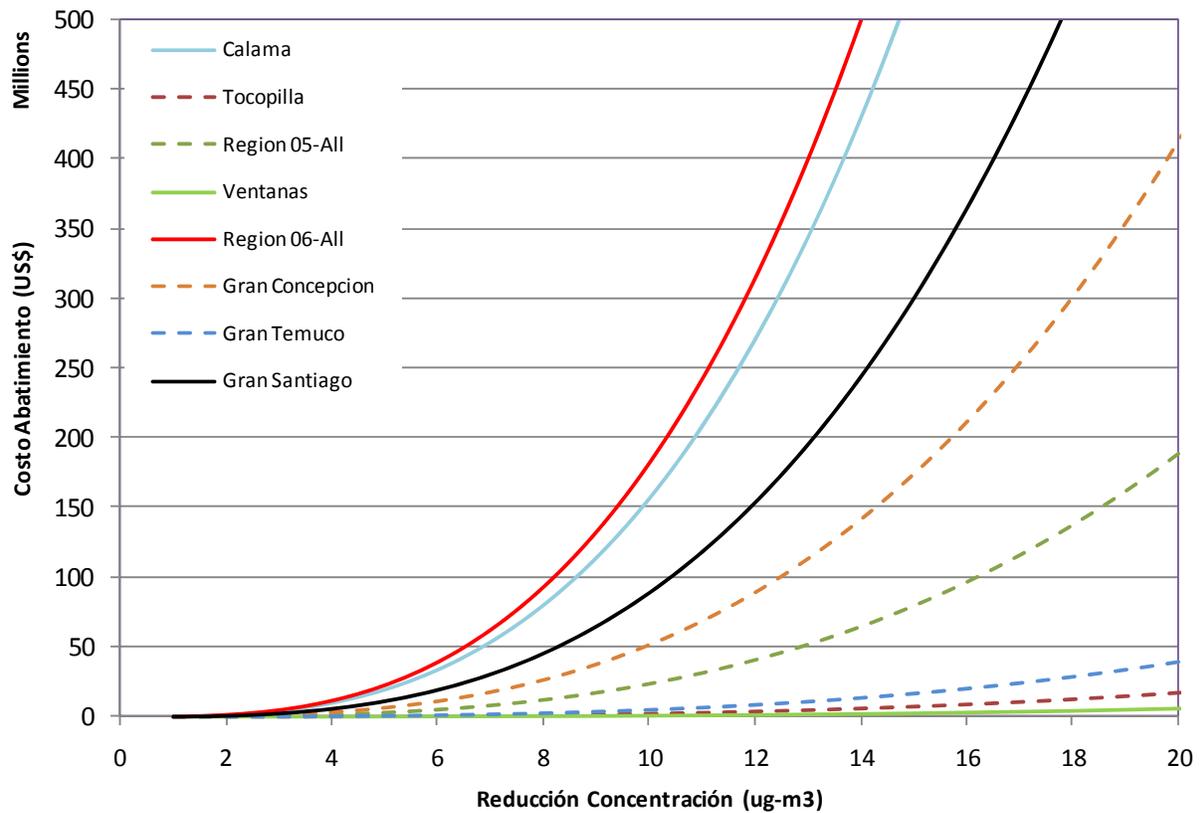
Tabla 0-31: Resultados Ajuste Cúbico a Curvas de Costo

Ciudad	Coficiente ( $\beta$ )	T-Test	N	Desviación estándar	R2 ajustado
Calama	55,841	11	92	5,025	0.56
Tocopilla	2,176	18	9	4,160	0.85
V Región	553,663	50	23	10,971	0.93
Ventanas	249	10	52	24	0.66
VI Región	530,361	14	23	36,752	0.86
Gran Concepción	55,518	26	101	2,103	0.86
Gran Temuco	5,650	10	5	3	0.71
Gran Santiago	85,694	164	229	524	0.99

**Ecuación: Costo Total= $\beta$ \*(Reducción Concentración)<sup>3</sup>**

Fuente: Elaboración Propia

Figura 0-6: Curva de Costos Totales de reducción de PM<sub>2,5</sub> para ciudades analizadas, año 2012



Fuente: Elaboración propia.

Destaca en el gráfico de la Figura 0-6 la gran diferencia entre las curvas para las distintas ciudades analizadas. Éstas pueden ser agrupadas en tres grupos:

- Bajo: corresponde a las ciudades de Ventanas, Tocopilla y Gran Temuco. En ellas el costo por  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  reducido de  $\text{PM}_{2.5}$  reducido es bajo, con lo cual pueden aplicarse muchas medidas para reducir el contaminante sin incurrir en grandes costos sociales.
- Medio: corresponde a Gran Concepción, Región 05-All y, en parte, Gran Santiago.
- Alto: asociadas a las regiones de Calama y Región 06-All. Poseen un rápido aumento de pendiente (*CMe*) lo que hace prácticamente imposible reducir partículas finas sin grandes costos sociales. Por ejemplo, para el caso de la VI región, el más drástico, reducir 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  se incurre en aproximadamente entre US\$ 150 y US\$ 200 millones anuales en costos sociales.

La Figura 0-7 muestra las curvas de costos calculadas en el estudio “Análisis de Antecedentes para evaluación de escenarios en la elaboración de la norma de Calidad primaria de  $\text{PM}_{2.5}$ ” realizado por DICTUC (2007) junto con su tabla de resultados (Tabla 0-32).

Figura 0-7: Curva de Costos Totales de reducción de  $\text{PM}_{2.5}$  DICTUC 2007 (US\$-año)

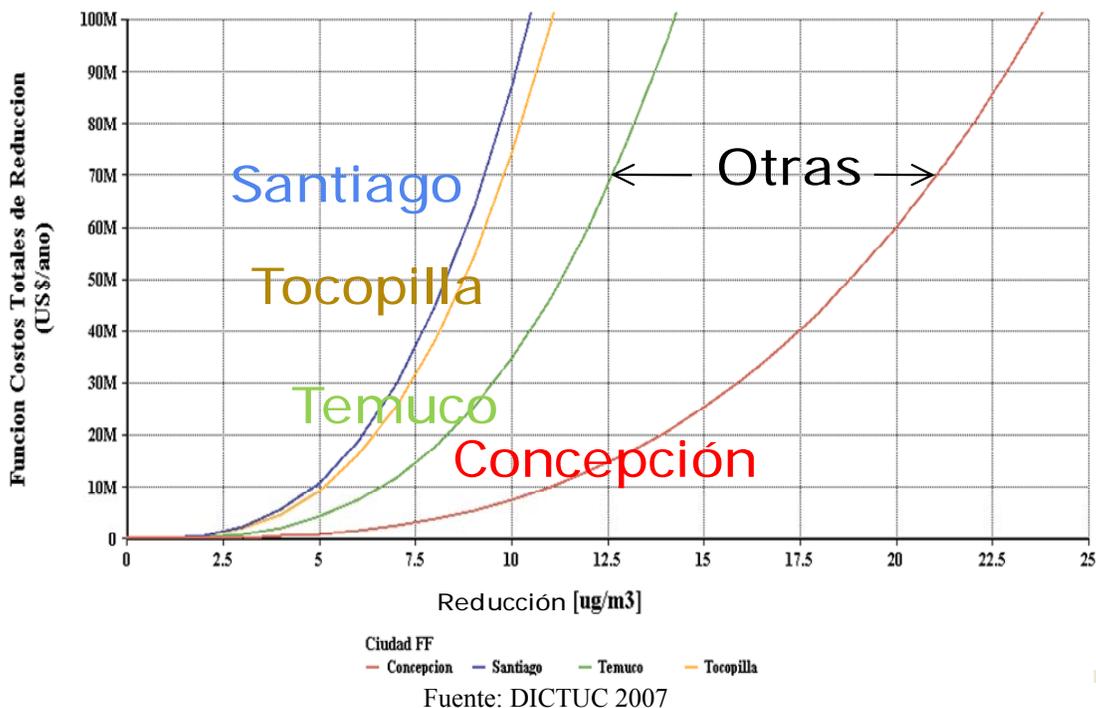


Tabla 0-32: Curvas de costo total por ciudad (US\$-año)

<b>Costo total por <math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math> reducido de <math>\text{PM}_{25}</math></b>					
Ciudad	Coficiente ( $\beta$ )	T-Test	N	Desviación Estandar	R2 Ajustada
Santiago	87.261	80,4	40	1.086	0,97
Concepción	7.525	8,2	18	922	0,74
Temuco	35.173	10,4	5	3.397	0,71
Tocopilla	74.549	17,9	9	4.160	0,85

Ecuación: Costo Total=  $\beta \cdot (\text{Reducción Concentración})^3$

Fuente: Elaboración propia

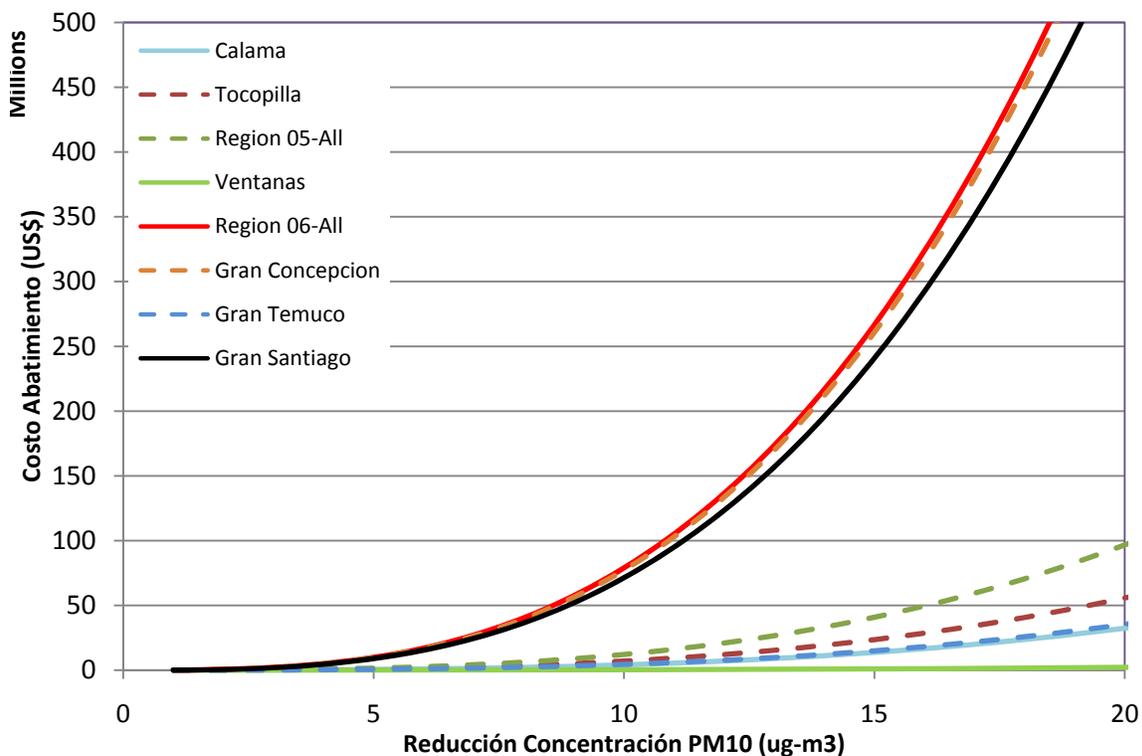
Se puede hacer el ejercicio de comparación de curvas obtenidas en los estudios. Las grandes diferencias obtenidas se deben principalmente al nivel de detalle de los datos entre los estudios, donde el presente estudio posee mejoras significativas en los inventarios de emisiones, concentraciones, beneficios, costos, entre otras cosas.

Particularmente, en el caso de Concepción una reducción de 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , implica un costo de US\$7 millones y US\$50 millones para el estudio antiguo y el presente respectivamente. Atribuimos esta diferencia a la actualización de los datos de las medidas utilizadas y al mayor número de las mismas.

Las diferencias más grandes entre los resultados de los dos estudios se encuentran en Tocopilla y Gran Temuco. Al igual que en el caso de Concepción, atribuimos la diferencia a la actualización de los datos de inventario más las medidas analizadas. Hay que tener en consideración que la gran efectividad mostrada en Gran Temuco se debe a las medidas aplicadas a la leña, las cuales son de bajo costo y gran efectividad.

Utilizando el mismo procedimiento anterior, se obtuvieron las curvas de costos para el material particulado grueso.

Figura 0-8: Curva de Costos Totales de reducción de  $\text{PM}_{10}$  para ciudades analizadas, año 2012



Fuente: Elaboración propia

Tabla 0-33: Resultados Ajuste Cúbico a Curvas de Costo

Ciudad	Coficiente	Test - T	N Muestra	Desviación estándar	R2 ajustado	Max Reducción
Calama	4,041	82	92	49	0.99	20.3
Tocopilla	6,961	37	89	187	0.94	5.6
Gran Valparaíso	92,380	70	64	1,319	0.99	5.3
Region 05-All	12,087	65	58	185	0.99	14.3
Region 06-All	78,990	101	23	780	1.00	6.9
Gran Concepción	77,276	12	108	6,436	0.57	9.0
Gran Temuco	4,417	38	63	117	0.96	14.5
Gran Santiago	71,368	103	229	691	0.98	9.2

Fuente: Elaboración propia

La primera gran diferencia entre los dos set de curvas obtenidas (Figura 0-6 y Figura 0-8) es el rango de costos que abarcan. La reducción de material particulado fino posee costos medio mucho más caros, lo que implica un aumento más acentuado en las pendiente de las curvas de las ciudades y por ende, costos significativamente mayores para una misma reducción. Por ejemplo, la reducción de  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para el caso de la VI región implicaría costos de USD 80 millones y USD 180 millones anuales para  $\text{PM}_{10}$  y  $\text{PM}_{2.5}$  respectivamente.

La ciudad de Calama es el caso más radical en cuanto a cambios en los costos. Se ubica como la segunda ciudad más barata en la reducción de material grueso, tiene costos muy altos en la reducción de fino, principalmente a que en este lugar el contaminante predominante es el  $\text{PM}_{10}$ .

Ciudades del sur como Gran Temuco y Gran Concepción tienen un efecto contrario al comparar sus curvas. Mientras que en el primer caso se mantiene prácticamente inalterable, para el segundo la reducción de  $\text{PM}_{2.5}$  es aún más económica que la de material grueso. Las ciudades del sur poseen grandes y, en varios casos, preocupantes concentraciones de material fino y muy poco grueso debido a la combustión de leña residencial, razón por la cual reducir este último contaminante resulta más caro.

## IX.5 Proyección de las Curvas de Costos

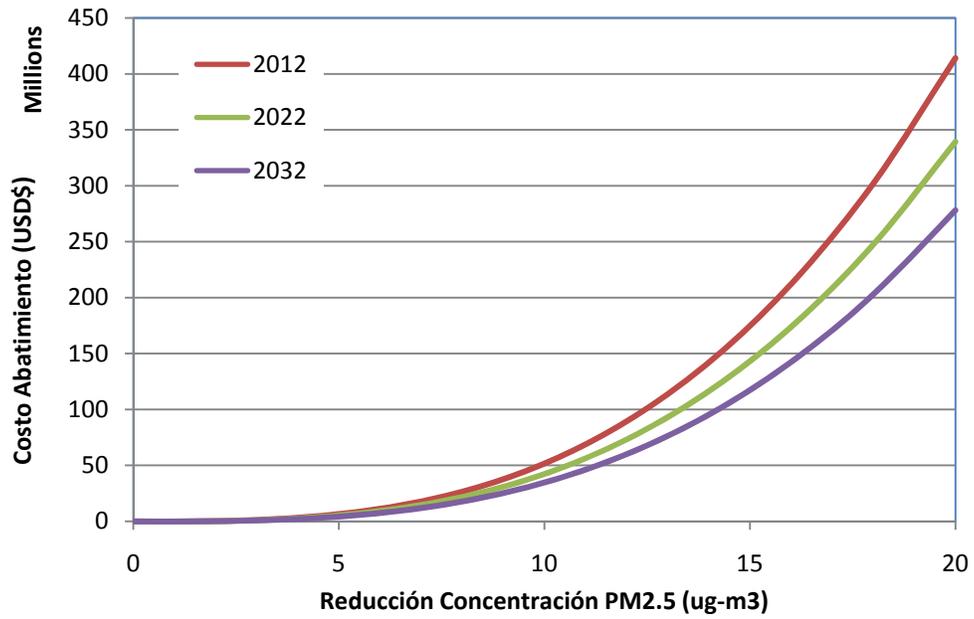
En la modelación se consideró que los costos disminuirán en el tiempo debido a dos efectos (Rubin et al. 2004):

- Mejoras tecnológicas: Se asume que se produce una disminución de los costos a una tasa anual de 1%.
- Mejoras en efectividad: Se asume que la eficiencia de reducción de las concentraciones de  $\text{PM}_{2.5}$  mejora 1% anual.

Este supuesto es de gran importancia porque afecta positivamente en el cálculo de los beneficios netos puesto que las medidas ya implementadas serán más baratas y con una mejor eficiencia en la remoción de contaminantes.

En la Figura 0-9 se muestra la variación de la curva de costo a través del tiempo de Gran Concepción.

Figura 0-9: Costo Total para Gran Concepción en el tiempo.

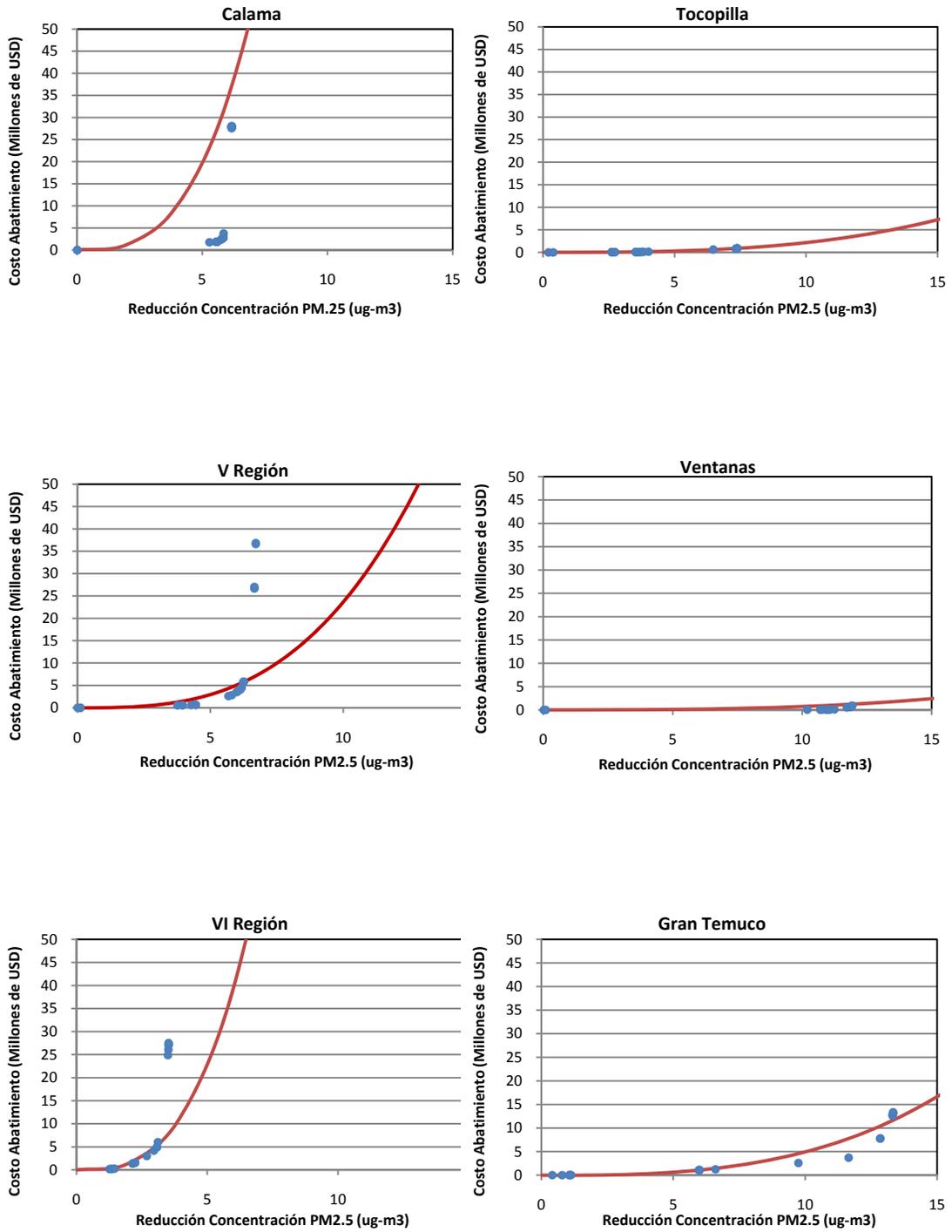


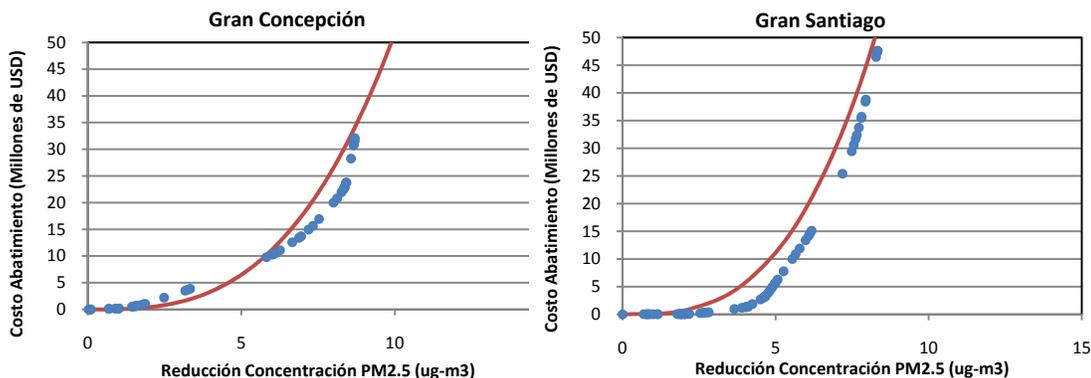
Fuente: Elaboración propia.

## IX.6 Curvas de Costo por Ciudad

A continuación se presentan las curvas de costos ajustadas para las ciudades analizadas.

Figura 0-10: Curva de Costos por Ciudad





Fuente: Elaboración propia

## IX.7 Análisis distributivo de costos

Las fuentes emisoras fueron clasificadas de manera que fuera posible asignarle las responsabilidades respectivas tanto en aporte a la contaminación como en la asignación de costos para alcanzar reducciones de particulado fino en las ciudades.

El cálculo de la distribución fue detallada en los siguientes sectores:

- Fuentes fijas: sector industrial, residencial, comercial y otros.
- Fuentes móviles
- Fuentes fugitivas

### IX.7.1 Análisis distributivo por ciudad y alternativa de norma

A continuación se realiza el análisis de la distribución de costos según alternativa de norma (de la n°1 a la 4 más el caso base) y por ciudad. Se pretende con estas figuras dar una guía para determinar el sector que necesitará más recursos para lograr la reducción de concentraciones deseada por ciudad.

Las ciudades poseen una reducción requerida ( $R_{Req}$ ) particular, correspondiente a los  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  que necesita para cumplir la norma, además de una reducción máxima alcanzada ( $R_{Alc}$ ), es decir, la que es posible aplicando todas las medidas posibles analizadas.

En algunas ciudades  $R_{Req}$  es mayor al  $R_{Alc}$ , por lo que el valor estimado de reducción requerida por la norma no se alcanza aún con todas las medidas en marcha. En estos casos es necesario extrapolar los datos con el fin de estimar la distribución de costos, con el supuesto de que la última medida alcanzará el valor de  $R_{Req}$ .

En otras palabras, la extrapolación de datos se hará para las ciudades en que la razón  $R_{Req}/R_{Alc}$  sea mayor a 1 y no variará en caso contrario. La Tabla 0-34 detalla el caso de cada ciudad,

mientras la Ecuación 4 detalla el factor de extrapolación de los datos. El valor de  $R_{Req}$  es el mayor por ciudad, es decir, en el último año de norma pues es la más estricta.

$$factor = \begin{cases} 1, & \text{si } \frac{R_{Req}}{R_{Alc}} \leq 1 \\ \frac{R_{Req}}{R_{Alc}}, & \text{si } \frac{R_{Req}}{R_{Alc}} > 1 \end{cases} \quad \text{Ecuación 4}$$

Tabla 0-34: Reducciones máximas requeridas por ciudad para  $PM_{2.5}$

Ciudad	Reducción requerida	Reducción alcanzada	Factor
Calama	8.20	6.17	1.33
Tocopilla	12.40	2.31	5.37
Región 05-All	14.19	6.71	2.12
Gran Valparaíso	0.00	2.22	1.00
Gran Santiago	22.40	6.58	3.40
Región 06-All	21.40	3.52	6.07
Gran Concepción	14.90	9.26	1.61
Gran Temuco	25.39	10.45	2.43

Fuente: Elaboración propia

La reducción alcanzada por medida es amplificada para cada ciudad por el factor de extrapolación respectivo, y con ella se construye una base de datos de distribución de costos por percentil de reducción (extrapolado), como la de la Tabla 0-35. Notar que el último percentil siempre alcanza la máxima reducción requerida.

Tabla 0-35: Reducciones alcanzadas por percentil y ciudad ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

Ciudad	Percentiles										
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
Calama	0.0	7.4	7.4	7.4	7.4	7.7	7.8	7.8	7.8	7.8	8.2
Gran Concepción	0.0	1.6	2.3	3.0	10.1	12.9	13.5	13.9	14.0	14.0	14.9
Gran Santiago	0.0	4.8	4.8	4.9	6.2	10.4	16.6	20.3	20.5	21.7	22.4
Gran Temuco	0.5	1.9	1.9	10.8	21.0	23.2	25.3	25.3	25.4	25.4	25.4
Gran Valparaíso	0.0	1.0	1.8	1.8	1.9	1.9	2.0	2.0	2.0	2.0	2.2
Region 05-All	0.0	8.0	8.3	9.4	9.4	12.3	12.9	12.9	13.2	13.2	14.2
Region 06-All	7.7	8.1	8.8	13.1	13.6	18.0	18.7	19.8	21.4	21.4	21.4
Tocopilla	0.3	0.5	4.8	7.2	12.3	12.3	12.4	12.4	12.4	12.4	12.4

Fuente: Elaboración propia

Tabla 0-36: Distribución de costos (%) por sector por percentil de reducción de PM<sub>2.5</sub>, ciudad: Calama

Percentil	Concentración	Ffugitivas	Fmoviles	Industrial	Otros	Residencial
0	0.01	0%	0%	100%	0%	0%
0.1	7.38	0%	0%	100%	0%	0%
0.2	7.41	0%	0%	100%	0%	0%
0.3	7.42	0%	0%	100%	0%	0%
0.4	7.43	0%	0%	99%	0%	1%
0.5	7.69	0%	0%	99%	0%	1%
0.6	7.75	0%	0%	99%	0%	1%
0.7	7.75	0%	0%	98%	0%	1%
0.8	7.75	0%	0%	98%	0%	1%
0.9	7.76	0%	3%	96%	0%	1%
1	8.20	24%	3%	72%	0%	1%

Fuente: Elaboración propia

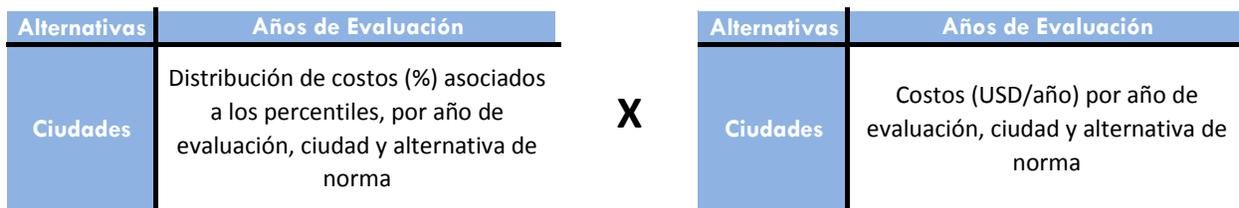
Se construye una base de datos que asocia los percentiles de concentración con el porcentaje de costos. El supuesto fundamental que se utiliza para este análisis es que la distribución porcentual de costos asociados a cada percentil no varía en el tiempo, es decir, en el caso de Calama en la Tabla 0-36, el P70% siempre reparte el 99% y 1% de los costos a los sectores industrial y residencial respectivamente para cualquier año evaluado.

A su vez, para cada alternativa de norma se construyó una matriz de las reducciones requeridas por año y ciudad. Estos valores obtenidos se cruzan con la base de datos de reducciones alcanzadas, de esta manera se obtiene el percentil de reducción que debe ser alcanzado de acuerdo a los requerimientos de cada año, ciudad y norma analizada<sup>38</sup>. Una vez identificado el percentil, es fácil asignarle una distribución de costos mediante la BD mencionada.

Paralelamente se construyó la tabla de costos por alternativa de norma y año de evaluación a través de las curvas de costos proyectadas (con el supuesto de disminución por mejora tecnológica y eficiencia de los procesos) y con el dato de la reducción requerida por año.

La Figura 0-11 representa esquemáticamente el cálculo de los costos finales distribuidos por sector a nivel de ciudad. Consiste en la multiplicación de las dos bases de datos formadas: la distribución de costos y los costos totales, ambos con las mismas dimensiones (ciudades, año de evaluación y alternativa de norma). La dimensión temporal es eliminada finalmente a través del cálculo del Valor Presente de los costos obteniéndose como resultado final la Tabla 0-37.

Figura 0-11: Esquema BD para el cálculo de distribución de costos



Fuente: Elaboración propia

<sup>38</sup> La extrapolación de datos realizada con anterioridad asegura que se alcanza la reducción de PM<sub>2.5</sub>, en el peor de los casos, para el percentil 1.

Tabla 0-37: Valor Presente de costos nacional por sector (Millones USD/año)

Sector	Base	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
Ffugitivas	869	2,036	2,045	2,231	794
Fmoviles	1,371	2,226	2,210	1,922	1,456
Industrial	2,184	7,966	5,643	5,254	4,140
Otros	1,491	4,284	3,379	2,208	2,349
Residencial	5,377	7,093	6,734	4,031	2,502
Comercial	0	5	5	2	1
Saturadas	5.0	7.0	6.1	5.8	5.6
Monitoreo	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2
<b>Total</b>	<b>11,301</b>	<b>23,621</b>	<b>20,027</b>	<b>15,658</b>	<b>11,252</b>

Fuente: Elaboración propia

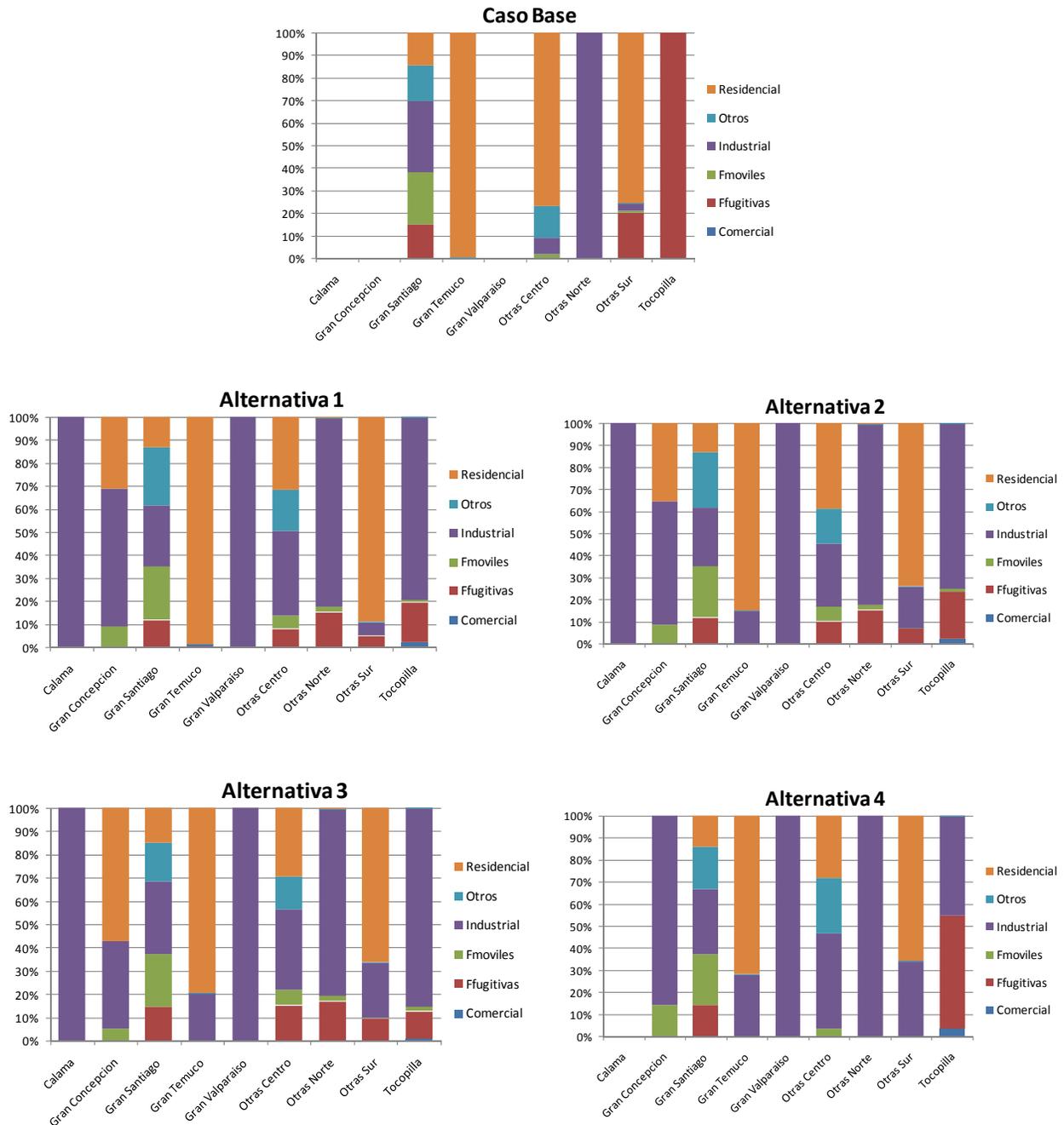
Con este resultado es posible obtener los resultados de la Tabla 0-38, la cual detalla la distribución de costos porcentual del valor presente de los costos mientras que la Figura 0-12 su representación gráfica.

Tabla 0-38: Distribución de costos por alternativa de norma, ciudad y sector

Alternativa de Norma	Zona	Comercial	Ffugitivas	Fmoviles	Industrial	Otros	Residencial	TOTAL
<b>Base</b>	Calama	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	Gran Concepción	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	Gran Santiago	0%	15%	23%	31%	16%	15%	100%
	Gran Temuco	0%	0%	0%	0%	0%	99%	100%
	Gran Valparaíso	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	Otras Centro	0%	0%	2%	7%	14%	77%	100%
	Otras Norte	0%	0%	0%	100%	0%	0%	100%
	Otras Sur	0%	20%	1%	3%	0%	75%	100%
Tocopilla	0%	100%	0%	0%	0%	0%	100%	
<b>Alternativa 1</b>	Calama	0%	0%	0%	100%	0%	0%	100%
	Gran Concepción	0%	0%	9%	60%	0%	31%	100%
	Gran Santiago	0%	12%	24%	26%	25%	13%	100%
	Gran Temuco	0%	0%	0%	1%	0%	98%	100%
	Gran Valparaíso	0%	0%	0%	100%	0%	0%	100%
	Otras Centro	0%	8%	6%	37%	18%	32%	100%
	Otras Norte	0%	15%	2%	82%	0%	1%	100%
	Otras Sur	0%	5%	0%	6%	0%	88%	100%
Tocopilla	3%	17%	2%	79%	0%	0%	100%	
<b>Alternativa 2</b>	Calama	0%	0%	0%	100%	0%	0%	100%
	Gran Concepción	0%	0%	9%	56%	0%	35%	100%
	Gran Santiago	0%	12%	24%	26%	25%	13%	100%
	Gran Temuco	0%	0%	0%	15%	0%	85%	100%
	Gran Valparaíso	0%	0%	0%	100%	0%	0%	100%
	Otras Centro	0%	10%	7%	28%	15%	39%	100%
	Otras Norte	0%	15%	2%	82%	0%	1%	100%
	Otras Sur	0%	7%	0%	19%	0%	74%	100%
Tocopilla	3%	21%	1%	75%	0%	0%	100%	
<b>Alternativa 3</b>	Calama	0%	0%	0%	100%	0%	0%	100%
	Gran Concepción	0%	0%	5%	38%	0%	57%	100%
	Gran Santiago	0%	15%	23%	31%	16%	15%	100%
	Gran Temuco	0%	0%	0%	20%	0%	79%	100%
	Gran Valparaíso	0%	0%	0%	100%	0%	0%	100%
	Otras Centro	0%	15%	7%	35%	14%	29%	100%
	Otras Norte	0%	17%	2%	80%	0%	1%	100%
	Otras Sur	0%	10%	0%	23%	0%	66%	100%
Tocopilla	1%	12%	2%	85%	0%	0%	100%	
<b>Alternativa 4</b>	Calama	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	Gran Concepción	0%	0%	14%	86%	0%	0%	100%
	Gran Santiago	0%	14%	23%	30%	19%	14%	100%
	Gran Temuco	0%	0%	0%	28%	0%	71%	100%
	Gran Valparaíso	0%	0%	0%	100%	0%	0%	100%
	Otras Centro	0%	0%	4%	43%	25%	28%	100%
	Otras Norte	0%	0%	0%	100%	0%	0%	100%
	Otras Sur	0%	0%	0%	34%	0%	66%	100%
Tocopilla	4%	51%	0%	45%	0%	0%	100%	

Fuente: Elaboración propia

Figura 0-12: Distribución de costos por alternativa de norma, ciudad y sector



Fuente: Elaboración propia

La Figura 0-12a, que representa el caso base, las localidades de Calama y Gran Valparaíso no entran a un programa de descontaminación puesto que los requerimientos no implica emplear medidas de mitigación, y en definitiva, no incurren en costos. Lo mismo ocurre para la Alternativa 4, la de menor exigencia dentro de las normativas evaluadas, donde nuevamente la ciudad del norte cumple la normativa (implícita por la norma de PM<sub>10</sub>) por lo que no debe

reducir una cantidad adicional de  $PM_{2.5}$ . La misma ciudad, para el resto de los escenarios, atribuye sus costos exclusivamente al sector industrial.

Destaca el sector residencial como el más influyente en cuanto a costos para las ciudades de la zona sur de nuestro país, independiente de la alternativa de norma considerada. Esto concuerda con los análisis preliminares ya que la fuente principal de la contaminación de material fino corresponde a la calefacción residencial producto de la combustión a leña. Siempre más del 50% de los costos van dirigidos a mitigar dicho tipo de fuente.

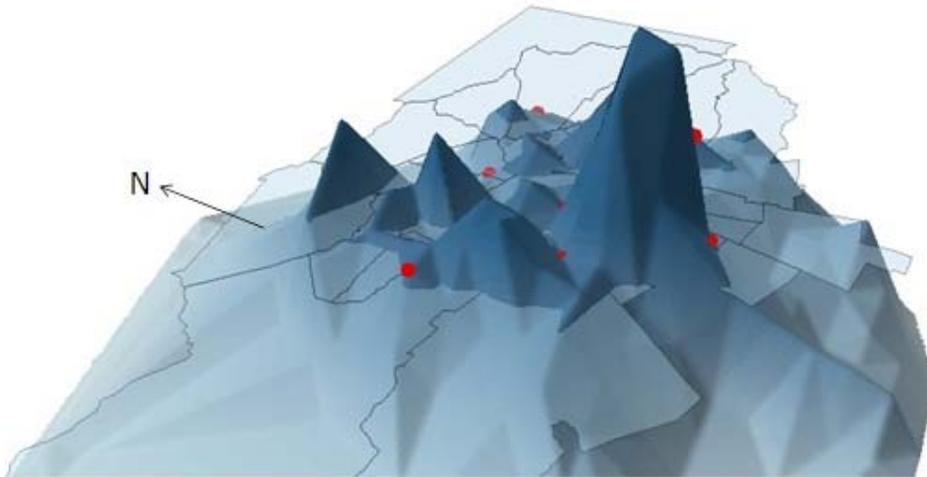
El caso de Gran Santiago es especial pues es la ciudad donde la responsabilidad de los sectores en los costos es similar y ninguno de ellos predomina significativamente sobre otros.

## Anexo X. Análisis de concentraciones de PM<sub>2.5</sub> en Santiago

Strappa et al. (2008) simularon las concentraciones para cada comuna de Santiago en base a modelaciones CAMX desarrolladas por DICTUC (2009).

La Figura 0-13 y Figura 0-14 muestran los resultados de las simulaciones obtenidas por Strappa et. al para PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> en Santiago

Figura 0-13: Promedio diario PM<sub>10</sub> de las concentraciones por celdas y monitores red MACAM

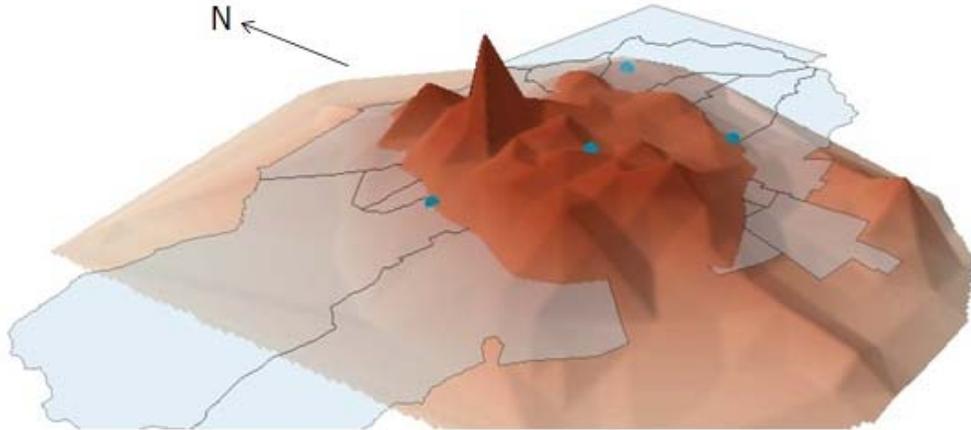


Fuente: “Importancia del modelo de exposición poblacional en el impacto del PM en la mortalidad diaria”. Strappa et. al (2008)

Como se observa de la figura anterior las zonas de altos niveles de PM<sub>10</sub> no son abarcadas por la red actual de monitores, siendo la zona sector sur – poniente (Pedro Aguirre Cerda, San Miguel, Lo Espejo, La Cisterna) y la zona norte (Quilicura, Huechuraba y Conchalí) las que presentan las mayores concentraciones.

Para el caso del PM<sub>2.5</sub>, Strappa et.al (2008) concluyó, al igual que para el PM<sub>10</sub>, que las zonas de altos niveles de concentración no son abarcadas por la red de monitores. La zona que presenta los niveles más altos de material particulado fino corresponde al sector centro – poniente (Renca, Quinta Normal), situación que se puede observar en la figura continuación.

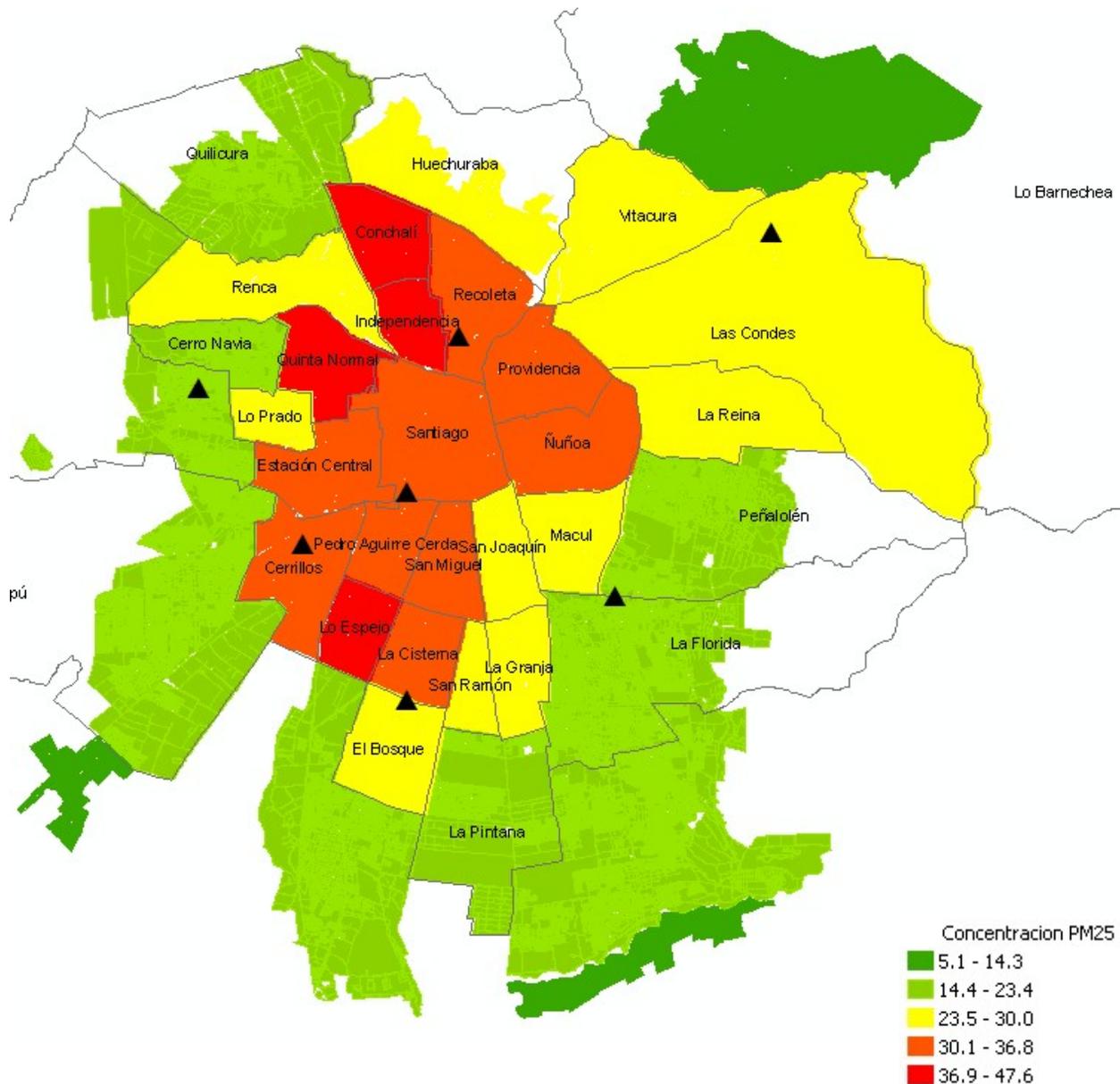
Figura 0-14: Promedio diario  $PM_{2.5}$  de las concentraciones por celdas y monitores red MACAM



Fuente: “Importancia del modelo de exposición poblacional en el impacto del PM en la mortalidad diaria”. Strappa et. al (2008)

En Santiago las comunas que presentan los niveles más altos de material particulado fino corresponden a Conchalí, Independencia, Quinta Normal y Lo espejo. El promedio anual de  $PM_{2.5}$  de estas comunas están en un rango de 36,9 y 47,6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , valores que superan ampliamente el nivel recomendado por la OMS (10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

Figura 0-15 Concentraciones de PM<sub>2.5</sub> por comuna para la ciudad de Santiago



Fuente: Elaboración propia a partir de modelación de CAMx Dictuc (2005)

Como se observa de la figura anterior, las comunas de Recoleta, Santiago, Providencia, Nuñoa, Estación Central, Cerrillos, Pedro Aguirre Cerda, San Miguel y La Cisterna corresponden a las segundas comunas con las mayores concentraciones anuales promedio de PM<sub>2.5</sub>. Los niveles para estas comunas se encuentran en un rango de 30,1 y 36,8 µg/m<sup>3</sup>.

Por el contrario, Lo Barnechea, Pirque y Padre Hurtado son las comunas con los niveles más bajos de PM<sub>2.5</sub>, con concentraciones anuales promedio que están en un rango de 5,1 y 14,3 µg/m<sup>3</sup>.

Según Bravo et al (2003) se puede establecer como supuesto que en la mayoría de las comunas de la ciudad de Santiago el nivel socioeconómico está muy relacionado con el nivel educacional, es así como en las comunas con mayor ingreso per cápita existe un alto nivel educacional y lo contrario sucede con las comunas más pobres. En base a este supuesto Bravo et al (2003), agrupan las comunas de Santiago como se describe en la Tabla 0-39.

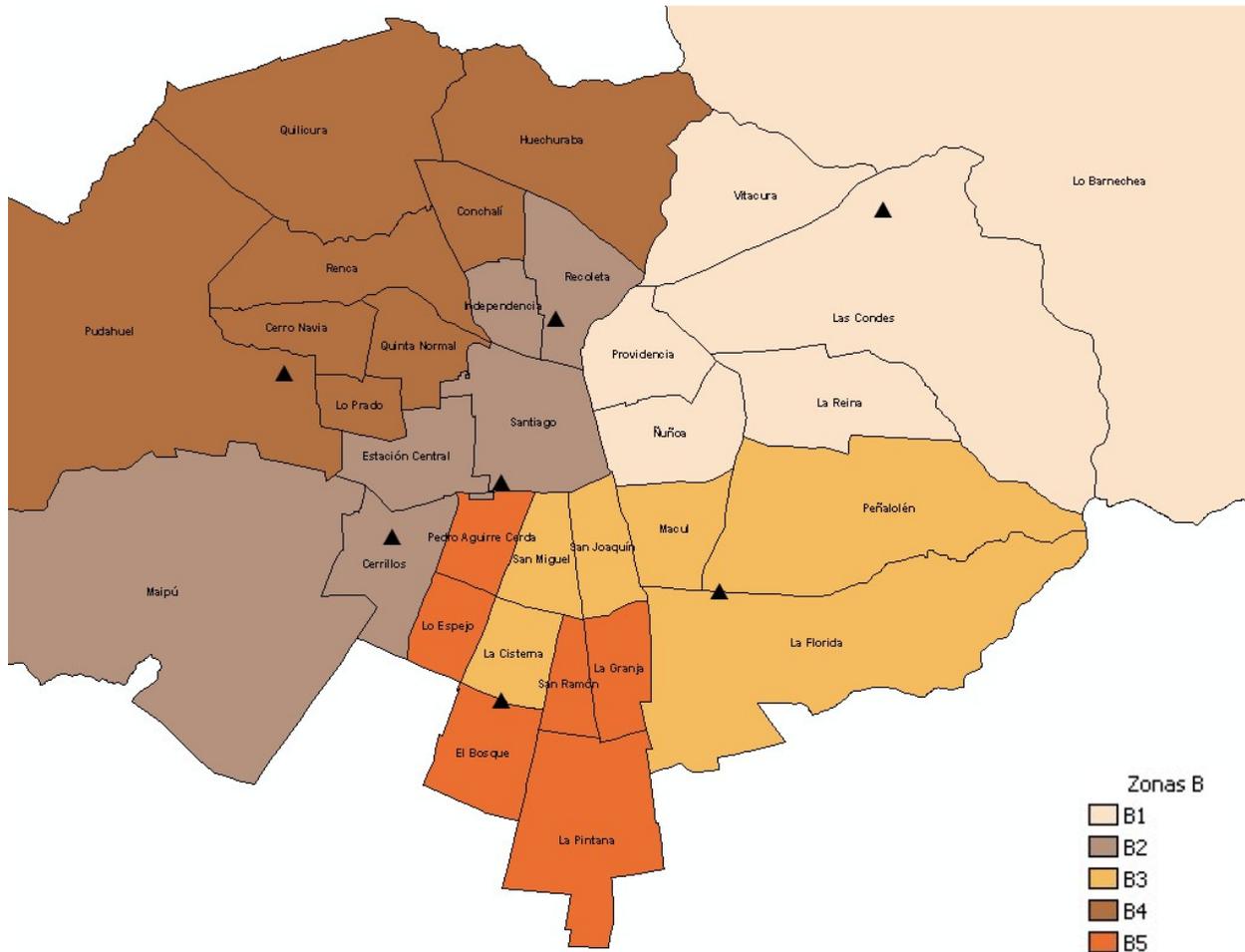
Tabla 0-39: Zonas para la ciudad de Santiago definidas en base a criterios socio económicos

Zona	Comunas
<b>B1</b>	Las Condes, La Reina, Ñuñoa, Providencia, Vitacura, Lo Barnechea
<b>B2</b>	Cerrillos, Estación Central, Independencia, Maipú, Recoleta, Santiago
<b>B3</b>	La Cisterna, La Florida, Macul, San Miguel, Peñalolén
<b>B4</b>	Cerro Navia, Conchalí, Huechuraba, Lo Prado, Quilicura, Quinta Normal, Renca, Pudahuel
<b>B5</b>	El Bosque, La Granja, La Pintana, Lo Espejo, San Joaquín, Pedro Aguirre Cerda, San Ramón

Fuente: Cifuentes y Bravo (2003)

A continuación se presenta de manera gráfica las distintas comunas de Santiago agrupadas bajo este criterio socioeconómico.

Figura 0-16: Zonas para la ciudad de Santiago definidas en base a criterios socio económicos



Fuente: Elaboración propia en base a Cifuentes y Bravo (2004)

A continuación se presenta el promedio, máximo y mínimo de las concentraciones de  $PM_{2.5}$  y las tasas de mortalidad para cada una de las zonas definidas para la ciudad de Santiago.

El nivel socioeconómico definido en la tabla Tabla 0-40 fue establecido de acuerdo al criterio utilizado por Bravo et al (2003). El nivel educacional 5 corresponde a un nivel educacional alto y el nivel 1 corresponde a un Nivel educacional bajo.

Tabla 0-40: Tasa de Mortalidad por grupo de edad y concentración ponderada de PM<sub>2.5</sub> por zona socioeconómica para Santiago

Zona	Nivel Socioeconómico	Población	Tasa Mortalidad			Conc PM <sub>2.5</sub> *
			Niños	Adultos	Ancianos	
B1	5	785000	43.83 (35 - 71)	119.13 (86 - 173)	4102.79 (3481 - 4871)	27.24 (9 - 34)
B3	4	956000	58.89 (53 - 98)	195.41 (169 - 260)	4159.66 (3589 - 6401)	26.34 (23 - 40)
B2	3	1080000	65.30 (48 - 123)	193.58 (124 - 355)	4495.97 (3758 - 7266)	29.38 (35 - 43)
B4	2	1020000	59.35 (49 - 77)	194.08 (115 - 288)	4163.05 (3787 - 5658)	27.50 (29 - 44)
B5	1	820000	60.91 (56 - 70)	218.91 (192 - 261)	4192.52 (3907 - 4570)	28.32 (23 - 40)

Fuente: Elaboración propia a partir de INE y CAMX DICTUC (2007)

La concentración de cada zona, corresponde a la concentración ponderada por la población de cada una de las zonas definidas.

Para las tasas de mortalidad, el máximo y mínimo presentado corresponde a los percentiles 95 y 5 respectivamente.

El análisis de correlación de los datos presentados en la tabla anterior arrojó la siguiente matriz de correlación.

 Tabla 0-41: Matriz de Correlación Tasa de mortalidad – Nivel socioeconómico y Concentración de PM<sub>2.5</sub> para Santiago

Variable	Nivel	Niños	Adultos	Ancianos	Conc ponderada por población
Nivel	1.00	-0.67	-0.83	-0.19	-0.46
Niños	-0.67	1.00	0.90	0.68	0.51
Adultos	-0.83	0.90	1.00	0.34	0.28
Ancianos	-0.19	0.68	0.34	1.00	0.83
Conc ponderada por población	-0.46	0.51	0.28	0.83	1.00

Fuente: Elaboración propia

De la tabla anterior se puede observar que existe una correlación directa y negativa entre el nivel socioeconómico y mortalidad, es decir, a mayor nivel socioeconómico, menor es la tasa de mortalidad lo cual podría explicarse por factores como: mejor alimentación, estilos de vida más saludables y mejor acceso a la salud.

Por otra parte el análisis entrega una correlación directa positiva entre la concentración de PM<sub>2.5</sub> y las tasas de mortalidad, lo que concuerda con la evidencia reportada por diversos estudios epidemiológicos con respecto a la contaminación de PM<sub>2.5</sub>. El grupo que presenta la mayor correlación entre mortalidad y concentración es de los ancianos (> 65 años), luego el grupo de los niños (hasta 18 años) y finalmente el de los adultos (18 – 64 años). Del análisis se puede concluir que las personas más vulnerables a los efectos de la contaminación son los ancianos.

De acuerdo a los resultados obtenidos del análisis de correlación, se puede observar que sectores socio económicos bajos en la ciudad de Santiago están en mayor riesgo de muerte, ya que por una parte están expuestos a una mayor concentración de material particulado fino y por otra parte presentarían mayores tasas de muerte por pertenecer a un nivel socioeconómico más bajo per se.

## **Anexo XI. Monitoreo**

Para el diseño de normas coherentes con la estrategia de País con respecto al control del material particulado es necesario contar con información que permita evaluar la calidad del aire y que entregue directrices que permitan enfocar los esfuerzos de control del material particulado correctamente.

En esta sección se detalla el criterio utilizado por la Unión Europea en su nueva directiva con respecto a este punto y la aplicación de este criterio, para el número mínimo de monitores, en Chile.

### **XI.1 Criterios de la Comisión de la Comunidad Europea**

La nueva Directiva de la Unión Europea establece los siguientes criterios con respecto a los monitores o puntos de medición de los siguientes contaminantes: dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno y los óxidos de nitrógeno, el material particulado, el plomo, el benceno y el monóxido de carbono.

#### **XI.1.1 Establecimiento de monitores**

En todas las zonas y aglomeraciones donde el nivel de contaminantes supere el umbral superior de evaluación establecida, la evaluación de la calidad del aire ambiente se efectuará mediante mediciones fijas. Esas mediciones fijas se podrán complementar con técnicas de modelización y/o mediciones indicativas con el fin de aportar información adecuada sobre la distribución espacial de la calidad del aire ambiente.

En aquellas zonas y aglomeraciones donde el nivel de contaminantes sea inferior al umbral superior de evaluación establecido para esos contaminantes, la evaluación de la calidad del medio ambiente podrá efectuarse mediante una combinación de mediciones fijas y técnicas de modelización y/o mediciones indicativas.

En todas las zonas y aglomeraciones donde el nivel de contaminantes sea menor al umbral inferior de evaluación establecido para esos contaminantes, será suficiente con utilizar técnicas de modelización o de estimación objetiva, o ambas, para la evaluación de la calidad del aire ambiente.

Por otra parte, la Directiva indica evaluaciones del aire en zonas rurales alejadas de las grandes fuentes de contaminación atmosférica con el objetivo de facilitar, como mínimo, información acerca de la concentración másica total y la especiación química de las concentraciones de partículas finas (PM<sub>2,5</sub>), en medias anuales, utilizando los criterios siguientes:

- Se instalará un punto de muestreo cada 100 000 km<sup>2</sup>
- Cada uno de los Estados miembros establecerá al menos una estación de medición o podrá acordar con los Estados limítrofes el establecimiento de una o varias estaciones de medición comunes que abarquen las zonas colindantes relevantes con el fin de conseguir la resolución espacial necesaria.

### **XI.1.2 Número Mínimo de Puntos de Muestras**

La Comunidad Europea en su Directiva establece, para aquellas zonas o aglomeraciones donde las mediciones fijas constituyan la única fuente de información para la evaluación de la calidad del aire, un número mínimo de muestreo para la medición de concentraciones SO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub> y material particulado (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>), de acuerdo a tres criterios. El primero para evaluar el cumplimiento de los valores límite para la protección de la salud humana y los umbrales de alerta en las zonas donde la medición fija es la única fuente de información, el segundo para evaluar el cumplimiento del objetivo de reducción a la exposición de PM<sub>2.5</sub> para la protección de la salud humana y el tercero para evaluar el cumplimiento de los niveles críticos para la protección de la vegetación en zonas que no sean aglomeraciones.

#### ***XI.1.2.1 Cumplimiento Valores Límite***

A continuación se detalla el número mínimo de puntos de muestreo para mediciones fijas establecidos por la Unión Europea en su nueva directiva, para *“evaluar el cumplimiento de los valores límites para la protección de la salud humana y de los umbrales de alerta, en las zonas y aglomeraciones donde las mediciones fijas constituyen la única fuente de información”*. (CONSEJO 2008)

##### **a) Fuentes Difusas**

En la Tabla 0-32 se resume el número mínimo de monitores o puntos de muestreo definidos para fuentes difusas.

Tabla 0-42: Número de monitores mínimos para medición de material particulado de acuerdo a la Directiva de la Comisión de la Comunidad Europea

Población Zona (Miles)	N° de Monitores Mínimo Mediciones MP (Suma PM10 y PM2.5)	
	Concentración máxima > umbral superior de evaluación	Umbral inferior <Concentración máxima < Umbral superior
0 - 249	2	1
250 - 499	3	2
500 - 749	3	2
750 - 999	4	2
1000 - 1499	6	3
1500 - 1999	7	3
2000 - 2749	8	4
2750 - 3749	10	4
3750 - 4749	11	6
4750 - 5999	13	6
>= 6000	15	7

**Fuente:** Directiva 2008/50/EC del Parlamento Europeo y del Consejo “Ambient Air Quality and Cleaner Air for Europe”, 21 Mayo 2008

Si un mismo monitor mide  $PM_{2.5}$  y  $PM_{10}$ , éste es considerado como dos puntos de muestreos. Por otra parte la Directiva exige que el número total de monitores para  $PM_{2.5}$  y  $PM_{10}$  en un Estado miembro, no difiera en un factor mayor a 2.

b) Fuentes Puntuales

El número de monitores o puntos de muestreo para la evaluación de la contaminación en las proximidades de fuentes puntuales se calculará teniendo en cuenta:

- Las densidades de emisión
- Las pautas probables de distribución de la contaminación atmosférica
- La exposición potencial de la población

**XI.1.2.2 Cumplimiento Objetivo de Reducción a la Exposición de  $PM_{2.5}$**

Para cumplir con el objetivo de reducción a la exposición de  $PM_{2.5}$ , la Directiva establece un punto de muestreo por cada millón de habitantes (se suman aglomeraciones y otras zonas urbanas de más de 100.000 habitantes). Estos puntos de muestreo podrán coincidir con los puntos de muestreo de acuerdo al criterio anterior.

### **XI.1.2.3 Cumplimiento de los Niveles Críticos**

Para zonas que no sean aglomeraciones la Directiva establece lo siguiente:

- Si *Concentración Máxima* > *Umbral superior de evaluación*: Una Estación cada 20.000 km<sup>2</sup>
- *Umbral inferior* < *Concentración Máxima* < *Umbral superior*: Una Estación cada 40.000 km<sup>2</sup>

Para zonas aisladas el número de monitores mínimos o puntos de muestreo para la evaluación de la contaminación se calculará teniendo en cuenta:

- Las pautas probables de distribución de la contaminación atmosférica
- La exposición potencial de la vegetación

Para aquellas zonas o aglomeraciones donde la información procedente de los puntos de muestreo de mediciones fijas se complemente con información obtenida mediante técnicas de modelización y/o mediciones indicativas, el número total de puntos de muestreo especificado en la, podrá reducirse hasta en un 50 %, siempre y cuando se cumplan las condiciones.

## **XI.2 Aplicación a Chile**

Tomando como referencia el criterio utilizado por la Unión Europea para determinar el número mínimo de monitores o puntos de muestreos y aplicado a Chile, el número de monitores para el País es el que se muestra en la Tabla 0-43. Es importante destacar que el número de monitores requeridos corresponde a los monitores requeridos sobre el número de monitores mínimos obtenidos

Tabla 0-43 Número de monitores mínimos para medición de material particulado en Chile de acuerdo a criterio de la Directiva de la Comisión de la Comunidad Europea

Zona	Área Metropolitana	Población (Miles)	N monitores PM25 actuales	N monitores PM10 actuales	N monitores totales actuales **	Monitores Mínimos ***	Monitores requeridos
Norte	Arica	185	-	3	3	2	1
	Alto Hospicio	50	1	2	3	2	-
	Pozo Almonte	11	-	1	1	2	1
	Antofagasta	297	-	2	2	3	1
	Calama*	138	-	3	3	2	1
	Mejillones	8	-	1	1	2	1
	Sierra Gorda	2	-	-	-	2	2
	Tocopilla	24	2	2	4	2	-
Centro	La Calera	50	-	3	3	2	1
	Cabildo	19	-	1	1	2	1
	Gran Valparaíso	734	2	5	7	3	-
	Putendo	15	-	2	2	2	-
	Llaillay	22	-	2	2	2	-
	Puchuncaví	13	-	4	4	2	2
	Quillota	76	-	5	5	2	2
	Catemu	12	-	2	2	2	-
	Los Andes	60	-	1	1	2	1
	Gran Santiago	6,046	4	7	11	10	-
	Gran Rancagua	243	-	1	1	2	1
	Requinoa	22	-	2	2	2	-
	Rengo	51	-	1	1	2	1
	San Fernando	64	-	1	1	2	1
Sur	Talca	202	2	3	5	2	-
	Gran Chillan	184	-	1	1	2	1
	Gran Concepción	871	3	12	15	4	1
	Arauco	35	-	4	4	2	1
	Codegua	11	-	1	1	2	1
	Gran Temuco	304	1	1	2	3	1

Fuente: Elaboración propia a partir de la Directiva 2008/50/EC del Parlamento Europeo y del Consejo “Ambient Air Quality and Cleaner Air for Europe”, 21 Mayo 2008

## **Anexo XII. Inventarios de emisiones y Factores Emision-Concentracion utilizados**

Tabla 0-44: Inventarios utilizados de emisión por ciudad y sector (ton/año)

Ciudad	Sector	Contaminante (ton/año)									TOTAL
		CO	CO2	COV	NH3	NOX	PM1025	PM25	PRS	SOX	
Calama	Comercial	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Ffugitivas	-	-	-	-	-	-	-	26,757	-	26,757
	Fmoviles	4,550	164,181	433	21	1,097	7	60	-	57	170,406
	Industrial	135	-	24	17	501	1,337	12,030	-	80,216	94,259
	OtrasFF	52	-	2	1	2	1	6	-	0	63
	Residencial	4	-	2	0	17	0	1	-	12	37
<b>Calama Total</b>		<b>4,741</b>	<b>164,181</b>	<b>460</b>	<b>39</b>	<b>1,616</b>	<b>1,344</b>	<b>12,097</b>	<b>26,757</b>	<b>80,286</b>	<b>291,522</b>
Gran Concepcion	Comercial	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Ffugitivas	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Fmoviles	20,295	970,560	-	114	5,769	36	326	-	25	997,124
	Industrial	-	-	-	425	4,507	907	8,166	-	12,232	26,236
	OtrasFF	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Residencial	44,794	-	10,327	-	545	1,295	11,659	-	-	68,621
<b>Gran Concepcion Total</b>		<b>65,089</b>	<b>970,560</b>	<b>10,327</b>	<b>538</b>	<b>10,821</b>	<b>2,239</b>	<b>20,150</b>	<b>-</b>	<b>12,257</b>	<b>1,091,981</b>
Gran Santiago	Comercial	-	-	8,192	-	-	-	-	-	-	8,192
	Ffugitivas	-	-	-	-	-	-	-	21,519	-	21,519
	Fmoviles	206,033	6,638,527	20,387	991	38,919	280	2,523	-	191	6,907,852
	Industrial	4,457	-	5,855	192	10,107	91	815	-	11,535	33,051
	OtrasFF	9,694	-	19,549	28,722	313	109	977	-	86	59,451
	Residencial	10,397	-	52,290	4,042	3,886	101	905	-	779	72,399
<b>Gran Santiago Total</b>		<b>230,581</b>	<b>6,638,527</b>	<b>106,274</b>	<b>33,947</b>	<b>53,225</b>	<b>580</b>	<b>5,221</b>	<b>21,519</b>	<b>12,591</b>	<b>7,102,465</b>
Gran Temuco	Comercial	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Ffugitivas	-	-	-	-	-	-	-	5,574	-	5,574
	Fmoviles	15,957	235,111	1,749	24	3,053	10	94	-	95	256,093
	Industrial	163	-	39	27	44	15	139	-	398	824
	OtrasFF	1,242	-	81	3	23	12	111	-	9	1,481
	Residencial	55,727	-	32,402	305	1,007	562	5,056	-	220	95,279
<b>Gran Temuco Total</b>		<b>73,088</b>	<b>235,111</b>	<b>34,272</b>	<b>359</b>	<b>4,127</b>	<b>600</b>	<b>5,400</b>	<b>5,574</b>	<b>721</b>	<b>359,251</b>
Gran Valparaiso	Comercial	-	-	501	-	-	-	-	-	-	501
	Ffugitivas	-	-	-	-	-	-	-	29,640	-	29,640
	Fmoviles	15,124	-	2,499	43	4,048	19	170	-	251	22,155
	Industrial	42	-	363	6	17	13	116	-	4	560
	OtrasFF	2,991	-	288	6	46	50	446	-	-	3,826
	Residencial	80	-	4,132	565	478	9	84	-	1,481	6,830
<b>Gran Valparaiso Total</b>		<b>18,237</b>	<b>-</b>	<b>7,783</b>	<b>620</b>	<b>4,589</b>	<b>91</b>	<b>817</b>	<b>29,640</b>	<b>1,736</b>	<b>63,512</b>

Fuente: Elaboración propia a partir de inventarios DICTUC, CENMA, SECTRA

Tabla 0-45: Inventarios utilizados de emisión por ciudad y sector (ton/año)

		Contaminante (ton/año)									
Ciudad	Sector	CO	CO2	COV	NH3	NOX	PM1025	PM25	PRS	SOX	TOTAL
Región 05-All	Comercial	-	-	5,082	4	-	-	-	-	-	5,086
	Ffugitivas	-	-	-	-	-	-	-	25,176	-	25,176
	Fmoviles	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Industrial	1,526	-	617	570	6,210	513	4,621	-	55,948	70,005
	OtrasFF	17,273	-	1,882	10,426	260	281	2,531	-	-	32,653
	Residencial	259	-	8,143	1,042	1,914	34	306	-	5,807	17,506
<b>Región 05-All Total</b>		19,058	-	15,725	12,042	8,384	829	7,458	25,176	61,755	150,426
Región 06-All	Comercial	-	-	11,106	-	-	-	-	-	-	11,106
	Ffugitivas	-	-	-	-	-	-	-	37,835	-	37,835
	Fmoviles	17,975	-	1,480	72	4,999	25	222	-	143	24,915
	Industrial	532	-	46	63	2,294	136	1,223	-	117,631	121,927
	OtrasFF	51,715	-	45,429	129,989	4,134	596	5,368	-	3,188	240,420
	Residencial	49,918	-	26,108	699	653	585	5,265	-	90	83,318
<b>Región 06-All Total</b>		120,141	-	84,170	130,823	12,081	1,342	12,079	37,835	121,052	519,522
Tocopilla	Comercial	2	-	-	-	1,712	1	12	-	-	1,729
	Ffugitivas	-	-	-	-	-	-	-	96	-	96
	Fmoviles	167	-	18	2	49	0	2	-	3	241
	Industrial	803	-	-	-	16,555	183	1,644	-	28,366	47,551
	OtrasFF	20	-	-	-	1	0	3	-	0	25
	Residencial	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Tocopilla Total</b>		992	-	18	2	18,318	185	1,661	96	28,369	49,641
Ventanas	Comercial	-	-	36	-	-	0	0	-	-	37
	Ffugitivas	-	-	-	-	-	-	-	816	-	816
	Fmoviles	732	-	30	-	1,311	3	27	-	3,951	6,054
	Industrial	225	-	169	411	2,693	53	477	-	36,878	40,907
	OtrasFF	1	-	1	0	0	0	0	-	-	2
	Residencial	31	-	47	0	1	0	4	-	0	83
<b>Ventanas Total</b>		989	-	282	411	4,005	57	509	816	40,829	47,899
<b>TOTAL</b>		<b>532,915</b>	<b>8,008,380</b>	<b>259,310</b>	<b>178,781</b>	<b>117,167</b>	<b>7,266</b>	<b>65,392</b>	<b>147,413</b>	<b>359,596</b>	<b>9,676,220</b>

Fuente: Elaboración propia a partir de inventarios DICTUC, CENMA, SECTRA

Tabla 0-46: Factores Emisión-Concentración (FEC) para cada ciudad (ton/( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ))

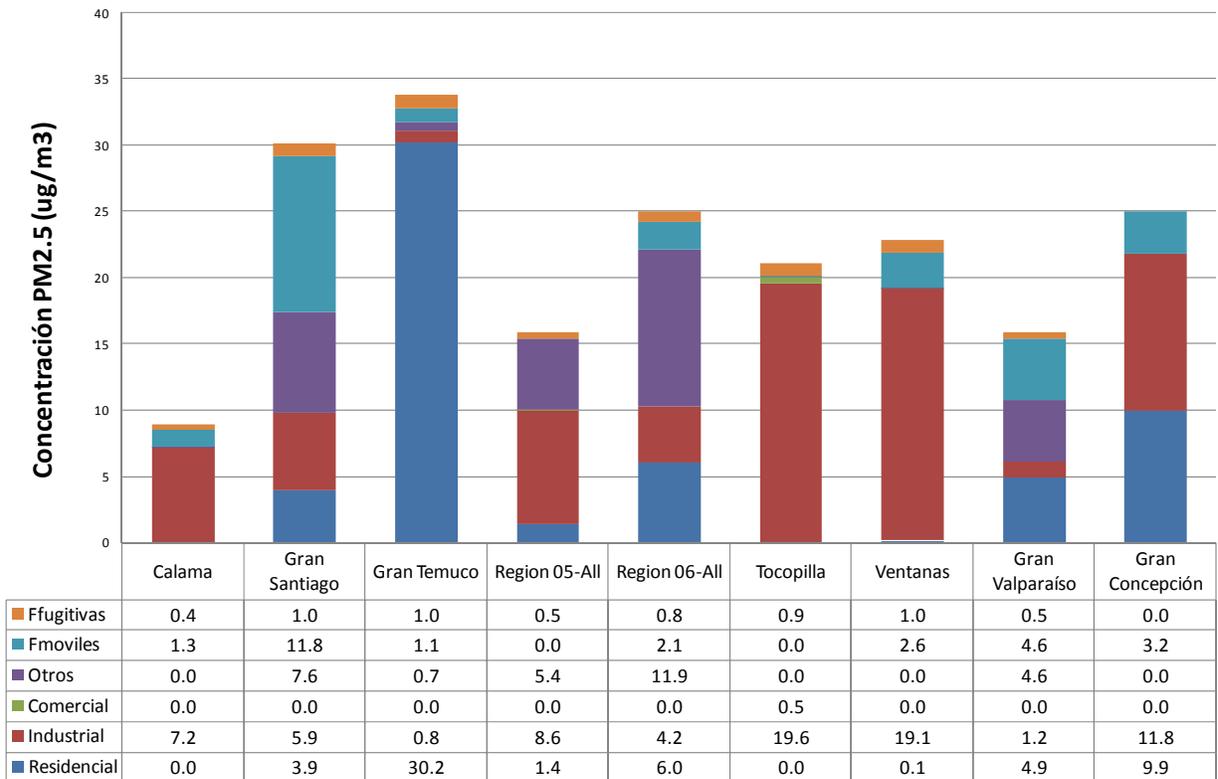
Ciudad	Param	FEC		Ciudad	Param	FEC	
		PM10	PM25			PM10	PM25
Calama	CO	-	-	Gran Valparaíso	CO	-	-
	CO2	-	-		CO2	-	-
	COV	-	-		COV	-	-
	NH3	-	-		NH3	218.17	218.17
	NOX	342.13	855.31		NOX	1,084.57	1,614.46
	PM10-25	102.45	-		PM10-25	7.72	-
	PM25	922.03	2,134.33		PM25	69.51	97.73
	PRS	3,641.77	70,812.28		PRS	4,503.38	59,090.68
	SOX	30,596.60	84,990.56		SOX	738.75	1,298.22
Gran Concepción	CO	-	-	Region 05-All	CO	-	-
	CO2	-	-		CO2	-	-
	COV	-	-		COV	-	-
	NH3	-	-		NH3	4,236.53	4,236.53
	NOX	1,947.24	1,947.24		NOX	1,981.55	2,949.66
	PM10-25	134.29	-		PM10-25	70.51	-
	PM25	1,208.65	1,208.65		PM25	634.55	892.10
	PRS	-	-		PRS	3,825.16	50,191.55
	SOX	4,411.35	4,411.35		SOX	26,272.13	46,168.87
Gran Santiago	CO	-	-	Region 06-All	CO	-	-
	CO2	-	-		CO2	-	-
	COV	-	-		COV	-	-
	NH3	6,299.25	6,299.25		NH3	29,260.34	29,260.34
	NOX	9,450.53	9,876.67		NOX	2,551.91	2,702.02
	PM10-25	35.83	-		PM10-25	102.06	-
	PM25	322.43	329.38		PM25	918.57	918.57
	PRS	2,351.34	22,628.27		PRS	5,137.85	47,953.31
	SOX	4,471.11	4,964.77		SOX	46,027.24	57,534.05
Gran Temuco	CO	-	-	Tocopilla	CO	-	-
	CO2	-	-		CO2	-	-
	COV	-	-		COV	-	-
	NH3	-	-		NH3	-	-
	NOX	6,040.90	6,040.90		NOX	3,634.60	4,088.92
	PM10-25	13.51	-		PM10-25	13.19	-
	PM25	121.59	168.16		PM25	118.67	123.62
	PRS	3,807.49	5,439.27		PRS	12.19	106.63
	SOX	-	-		SOX	10,131.95	12,664.94
Ventanas	CO	-	-	Ventanas	CO	-	-
	CO2	-	-		CO2	-	-
	COV	-	-		COV	-	-
	NH3	-	-		NH3	-	-
	NOX	824.12	824.12		NOX	824.12	824.12
	PM10-25	3.88	-		PM10-25	3.88	-
	PM25	34.89	34.89		PM25	34.89	34.89
	PRS	120.00	839.97		PRS	120.00	839.97
	SOX	16,801.92	16,801.92		SOX	16,801.92	16,801.92

Fuente: Elaboración propia a partir de inventarios DICTUC, CENMA, SECTRA

### Anexo XIII. Contribución por sector en concentraciones de PM<sub>2.5</sub>

Se detalla en la Figura 0-17 la responsabilidad de cada sector<sup>39</sup> en el total de PM<sub>2.5</sub> de cada ciudad.

Figura 0-17: Contribución a la concentración total de PM<sub>2.5</sub> por ciudad y sector, año 2012



Fuente: Elaboración propia

La finalidad de realizar este análisis radica que con él se especifica el sector que ocasiona mayores problemas, y en consecuencia, al cual se deberá dirigir los esfuerzos para reducir sus emisiones.

Las ciudades que presentan mayores problemas de material particulado fino corresponden a Gran Temuco y Gran Santiago, ambas con más de 30 µg/m<sup>3</sup>. Mientras que en el primer caso es indiscutible que los recursos estarán enfocados casi en totalidad al sector residencial (aproximadamente el 90%), diferente es el caso de la capital puesto que tanto las fuentes móviles como las industrias y otras fuentes fijas poseen semejanza en su contribución a la contaminación total.

<sup>39</sup> Sectores: residencial, comercial, industrial, otras fuentes fijas, fuentes móviles y fuentes fugitivas

## Anexo XIV. Resultados Detallados por Ciudad

La Tabla 0-47 muestra las reducciones necesarias para el cumplimiento de las distintas ciudades analizadas.

Tabla 0-47: Reducciones requeridas por ciudad (ug/m3)

Ciudad	2012					2022					2032				
	Alternativa Norma					Alternativa Norma					Alternativa Norma				
	Base	1	2	3	4	Base	1	2	3	4	Base	1	2	3	4
Arica	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Alto Hospicio	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	3.2	3.2	0.1	0.1	0.1	8.2	8.2	8.2	3.2
Pozo Almonte	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Iquique	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.3	1.3	1.3	1.0
Antofagasta	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Calama	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.5	4.5	4.5	0.0
Mejillones	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Sierra Gorda	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Tocopilla	1.2	2.4	1.2	1.2	1.2	1.2	7.4	7.4	2.4	2.4	1.2	12.4	12.4	12.4	7.4
Caldera	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Chañaral	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Copiapó	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Huasco	1.9	4.2	1.9	1.9	1.9	1.9	9.2	9.2	4.2	4.2	1.9	14.2	14.2	14.2	9.2
La Serena-Coquimbo	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5	1.5	1.5	0.0
Ovalle	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5	1.5	1.5	0.0
La Calera	0.8	3.5	0.8	0.8	0.8	0.8	8.5	8.5	3.5	3.5	0.8	13.5	13.5	13.5	8.5
Cabildo	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.7	0.7	0.0
Quintero	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.5	2.5	0.0	0.0	0.0	7.5	7.5	7.5	2.5
Gran Valparaíso	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.4	4.4	0.0	0.0	0.0	9.4	9.4	9.4	4.4
Putendo	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.9	2.9	0.0	0.0	0.0	7.9	7.9	7.9	2.9
Llailay	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.8	3.8	0.0	0.0	0.0	8.8	8.8	8.8	3.8
Puchuncavi	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3	1.3	0.0	0.0	0.0	6.3	6.3	6.3	1.3
Quillota	0.0	2.4	0.0	0.0	0.0	0.0	7.4	7.4	2.4	2.4	0.0	12.4	12.4	12.4	7.4
Catemu	0.0	1.9	0.0	0.0	0.0	0.0	6.9	6.9	1.9	1.9	0.0	11.9	11.9	11.9	6.9
Los Andes	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.1	4.1	4.1	0.0
San Antonio	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.0	4.0	0.0	0.0	0.0	9.0	9.0	9.0	4.0
San Felipe	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.0	4.0	0.0	0.0	0.0	9.0	9.0	9.0	4.0
Gran Santiago	16.1	16.1	16.1	16.1	16.1	16.1	16.7	16.7	16.1	16.1	16.1	21.7	21.7	21.7	16.7
Rancagua	9.2	12.4	9.2	9.2	9.2	9.2	17.4	17.4	12.4	12.4	9.2	22.4	22.4	22.4	17.4
Requinoa	3.2	7.6	3.0	3.0	3.0	3.2	12.6	12.6	7.6	7.6	3.2	17.6	17.6	17.6	12.6
Rengo	4.5	11.4	6.4	6.4	6.4	4.5	16.4	16.4	11.4	11.4	4.5	21.4	21.4	21.4	16.4
San Fernando	3.1	6.3	2.6	2.6	2.6	3.1	11.3	11.3	6.3	6.3	3.1	16.3	16.3	16.3	11.3
San Vicente	0.0	2.7	0.0	0.0	0.0	0.0	7.7	7.7	2.7	2.7	0.0	12.7	12.7	12.7	7.7
Cauquenes	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.0	4.0	0.0	0.0	0.0	9.0	9.0	9.0	4.0
Constitución	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.5	2.5	2.5	0.0
Curico	17.6	6.8	6.8	6.8	6.8	17.6	10.0	10.0	6.8	6.8	17.6	15.0	15.0	15.0	10.0
Linares	17.6	6.8	6.8	6.8	6.8	17.6	10.0	10.0	6.8	6.8	17.6	15.0	15.0	15.0	10.0
Talca	16.5	12.2	7.1	7.1	7.1	16.5	17.2	17.2	12.2	12.2	16.5	22.2	22.2	22.2	17.2
Chillan	15.5	7.1	4.6	4.6	4.6	15.5	12.1	12.1	7.1	7.1	15.5	17.1	17.1	17.1	12.1
Gran Concepción	0.0	4.9	0.0	0.0	0.0	0.0	9.9	9.9	4.9	4.9	0.0	14.9	14.9	14.9	9.9
Arauco	0.0	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	6.2	6.2	1.2	1.2	0.0	11.2	11.2	11.2	6.2
Codegua	4.0	9.9	4.9	4.9	4.9	4.0	14.9	14.9	9.9	9.9	4.0	19.9	19.9	19.9	14.9
Los Angeles	5.3	6.6	1.6	1.6	1.6	5.3	11.6	11.6	6.6	6.6	5.3	16.6	16.6	16.6	11.6
San Carlos	5.3	6.6	1.6	1.6	1.6	5.3	11.6	11.6	6.6	6.6	5.3	16.6	16.6	16.6	11.6
Angol	5.3	6.6	1.6	1.6	1.6	5.3	11.6	11.6	6.6	6.6	5.3	16.6	16.6	16.6	11.6
Nueva Imperial	5.3	6.6	1.6	1.6	1.6	5.3	11.6	11.6	6.6	6.6	5.3	16.6	16.6	16.6	11.6
Gran Temuco	18.2	14.2	9.2	9.2	9.2	18.2	19.2	19.2	14.2	14.2	18.2	24.2	24.2	24.2	19.2
Osorno	16.2	12.8	7.8	7.8	7.8	16.2	17.8	17.8	12.8	12.8	16.2	22.8	22.8	22.8	17.8
Puerto Montt	5.3	6.6	1.6	1.6	1.6	5.3	11.6	11.6	6.6	6.6	5.3	16.6	16.6	16.6	11.6
Valdivia	5.3	6.6	1.6	1.6	1.6	5.3	11.6	11.6	6.6	6.6	5.3	16.6	16.6	16.6	11.6
Coihaique	8.6	15.0	10.0	10.0	10.0	8.6	20.0	20.0	15.0	15.0	8.6	25.0	25.0	25.0	20.0
Punta Arenas	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.5	2.5	2.5	0.0

Fuente: Elaboración Propia

En las Tabla 0-48 y Tabla 0-49 es posible apreciar los beneficios y costos para las distintas ciudades analizadas en el presente estudio, considerando ambos escenarios de beneficios considerados en el análisis.

Tabla 0-48: Beneficio por ciudad para escenario de beneficios alto.

Ciudad	Base	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
Arica	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Alto Hospicio	2.5	85.4	85.4	55.6	22.9
Pozo Almonte	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Iquique	103.8	109.5	109.5	109.5	103.8
Antofagasta	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Calama	0.0	80.7	80.7	80.7	0.0
Mejillones	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Sierra Gorda	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Tocopilla	17.0	86.8	79.0	56.7	41.3
Caldera	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Chañaral	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Copiapó	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Huasco	7.7	32.7	28.3	21.8	17.3
La Serena-Coquimbo	0.0	127.8	127.8	127.8	0.0
Ovalle	0.0	15.6	15.6	15.6	0.0
La Calera	30.8	278.6	230.4	169.7	128.1
Cabildo	0.0	1.6	1.6	1.6	0.0
Quintero	0.0	36.4	36.4	24.4	8.2
Gran Valparaíso	0.0	2241.6	2241.6	1332.1	623.6
Putendo	0.0	15.1	15.1	9.9	3.6
Llailay	0.0	40.1	40.1	24.7	10.6
Puchuncaví	0.0	15.7	15.7	12.1	2.4
Quillota	0.7	324.5	266.0	182.3	125.0
Catemu	0.0	30.2	25.6	17.1	11.2
Los Andes	0.0	39.0	39.0	39.0	0.0
San Antonio	0.0	266.8	266.8	161.9	71.9
San Felipe	0.0	148.9	148.9	90.4	40.2
Gran Santiago	61364.1	66817.4	66817.4	66052.2	61888.7
Rancagua	644.7	1134.7	1030.2	918.5	842.0
Requinoa	24.5	88.0	71.4	59.1	50.6
Rengo	116.8	391.0	331.2	290.2	262.1
San Fernando	110.3	358.0	297.0	240.4	201.7
San Vicente	0.0	98.3	79.4	55.1	38.5
Cauquenes	0.0	77.8	77.8	47.2	21.0
Constitución	0.0	15.8	15.8	15.8	0.0
Curico	1379.7	754.8	754.8	675.2	589.5
Linares	936.6	512.4	512.4	458.3	400.2
Talca	2493.3	2410.5	2059.3	1818.6	1653.5
Chillan	1830.5	1282.4	1144.5	956.4	827.5
Gran Concepción	0.0	5249.8	3873.6	2910.8	2250.7
Arauco	0.0	84.8	75.6	48.2	29.5
Codegua	14.8	49.9	41.4	35.6	31.6
Los Angeles	465.4	907.5	704.5	565.4	470.0
San Carlos	117.0	228.0	177.0	142.1	118.1
Angol	179.1	349.2	271.1	217.5	180.8
Nueva Imperial	75.0	146.2	113.5	91.1	75.7
Gran Temuco	3721.8	3669.2	3194.6	2869.2	2646.1
Osorno	1574.5	1607.9	1382.3	1227.6	1121.6
Puerto Montt	609.9	1189.1	923.2	740.9	615.8
Valdivia	508.4	991.2	769.6	617.6	513.4
Coihaique	205.9	450.8	395.1	356.9	330.8
Punta Arenas	0.0	50.6	50.6	50.6	0.0

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 0-49: Beneficio por ciudad para escenario de beneficios bajo

Ciudad	Base	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
Arica	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Alto Hospicio	0.4	14.3	14.3	9.3	3.8
Pozo Almonte	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Iquique	17.0	17.9	17.9	17.9	17.0
Antofagasta	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Calama	0.0	13.2	13.2	13.2	0.0
Mejillones	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Sierra Gorda	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Tocopilla	2.8	14.2	12.9	9.3	6.8
Caldera	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Chañaral	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Copíapo	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Huasco	1.4	6.0	5.2	4.0	3.2
La Serena-Coquimbo	0.0	23.6	23.6	23.6	0.0
Ovalle	0.0	2.9	2.9	2.9	0.0
La Calera	6.2	56.3	46.5	34.3	25.9
Cabildo	0.0	0.3	0.3	0.3	0.0
Quintero	0.0	7.3	7.3	4.9	1.7
Gran Valparaíso	0.0	452.9	452.9	269.2	126.0
Putendo	0.0	3.1	3.1	2.0	0.7
Llaillay	0.0	8.1	8.1	5.0	2.1
Puchuncavi	0.0	3.2	3.2	2.4	0.5
Quillota	0.1	65.6	53.8	36.8	25.2
Catemu	0.0	6.1	5.2	3.4	2.3
Los Andes	0.0	7.9	7.9	7.9	0.0
San Antonio	0.0	53.9	53.9	32.7	14.5
San Felipe	0.0	30.1	30.1	18.3	8.1
Gran Santiago	11152.8	12143.9	12143.9	12004.8	11248.1
Rancagua	122.2	215.1	195.3	174.1	159.6
Requinoa	4.7	16.7	13.5	11.2	9.6
Rengo	22.1	74.1	62.8	55.0	49.7
San Fernando	20.9	67.9	56.3	45.6	38.2
San Vicente	0.0	18.6	15.1	10.5	7.3
Cauquenes	0.0	15.1	15.1	9.2	4.1
Constitución	0.0	3.1	3.1	3.1	0.0
Curico	268.5	146.9	146.9	131.4	114.7
Linares	182.3	99.7	99.7	89.2	77.9
Talca	485.3	469.2	400.8	353.9	321.8
Chillan	330.9	231.8	206.9	172.9	149.6
Gran Concepción	0.0	949.0	700.2	526.2	406.8
Arauco	0.0	15.3	13.7	8.7	5.3
Codegua	2.8	9.5	7.8	6.7	6.0
Los Angeles	84.1	164.0	127.4	102.2	85.0
San Carlos	21.1	41.2	32.0	25.7	21.3
Angol	31.3	61.0	47.4	38.0	31.6
Nueva Imperial	13.1	25.5	19.8	15.9	13.2
Gran Temuco	650.5	641.3	558.3	501.5	462.5
Osorno	283.1	289.1	248.5	220.7	201.6
Puerto Montt	109.7	213.8	166.0	133.2	110.7
Valdivia	91.4	178.2	138.4	111.0	92.3
Coihaique	34.9	76.4	67.0	60.5	56.0
Punta Arenas	0.0	9.4	9.4	9.4	0.0

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 0-50: Costo por ciudad para escenario de beneficios alto.

Ciudad	Base	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
Arica	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Alto Hospicio	0.4	15.2	15.2	13.2	1.1
Pozo Almonte	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Iquique	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
Antofagasta	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Calama	0.0	2.2	2.2	2.2	0.0
Mejillones	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Sierra Gorda	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Tocopilla	24.8	356.5	361.4	241.8	67.7
Caldera	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Chañaral	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Copiapó	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Huasco	3.4	197.0	180.5	113.2	37.6
La Serena-Coquimbo	0.0	0.2	0.2	0.2	0.0
Ovalle	0.0	0.2	0.2	0.2	0.0
La Calera	0.6	161.3	150.3	94.9	27.4
Cabildo	0.0	0.1	0.1	0.1	0.0
Quintero	0.0	17.1	17.1	15.5	0.7
Gran Valparaíso	0.0	38.5	38.5	30.3	3.2
Putendo	0.0	20.2	20.2	17.9	0.9
Llailay	0.0	29.6	29.6	24.5	2.0
Puchuncavi	0.0	9.3	9.3	9.0	0.2
Quillota	0.4	111.8	108.1	70.7	16.2
Catemu	0.0	94.4	92.5	61.9	12.7
Los Andes	0.0	2.5	2.5	2.5	0.0
San Antonio	0.0	32.8	32.8	26.6	2.4
San Felipe	0.0	32.8	32.8	26.6	2.4
Gran Santiago	9850.3	9546.7	9546.7	10319.2	9557.1
Rancagua	2159.4	5252.1	4857.5	3644.6	2826.5
Requinoa	111.8	3831.5	3011.2	1864.5	900.3
Rengo	3690.5	8898.0	6522.9	4357.0	2844.4
San Fernando	83.6	2769.7	2297.5	1415.6	605.0
San Vicente	0.0	940.8	903.7	584.6	140.7
Cauquenes	0.0	7.0	7.0	5.6	0.6
Constitución	0.0	0.2	0.2	0.2	0.0
Curico	389.7	85.8	85.8	81.0	63.0
Linares	389.7	85.8	85.8	81.0	63.0
Talca	321.0	277.8	202.7	137.8	93.6
Chillan	266.6	91.8	85.2	57.1	32.7
Gran Concepción	0.0	532.0	466.8	288.1	102.0
Arauco	0.0	15.7	15.4	10.7	2.0
Codegua	1581.5	6524.2	4870.8	3147.1	1866.1
Los Angeles	29.3	81.3	66.4	41.0	18.2
San Carlos	29.3	81.3	66.4	41.0	18.2
Angol	29.3	81.3	66.4	41.0	18.2
Nueva Imperial	29.3	81.3	66.4	41.0	18.2
Gran Temuco	432.4	397.0	288.1	204.3	150.8
Osorno	305.0	310.8	226.1	155.8	108.9
Puerto Montt	29.3	81.3	66.4	41.0	18.2
Valdivia	29.3	81.3	66.4	41.0	18.2
Coihaique	121.5	456.0	331.1	238.8	181.0
Punta Arenas	0.0	0.2	0.2	0.2	0.0

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 0-51: Costo por ciudad para escenario de beneficios bajo

Ciudad	Base	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
Arica	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Alto Hospicio	0.2	3.9	3.9	3.4	0.4
Pozo Almonte	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Iquique	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Antofagasta	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Calama	0.0	0.6	0.6	0.6	0.0
Mejillones	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Sierra Gorda	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Tocopilla	6.3	89.3	90.5	60.6	17.1
Caldera	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Chañaral	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Copiapo	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Huasco	1.0	49.4	45.3	28.5	9.5
La Serena-Coquimbo	0.0	0.1	0.1	0.1	0.0
Ovalle	0.0	0.1	0.1	0.1	0.0
La Calera	0.3	40.5	37.7	23.9	7.0
Cabildo	0.0	0.1	0.1	0.1	0.0
Quintero	0.0	4.3	4.3	3.9	0.2
Gran Valparaiso	0.0	9.7	9.7	7.6	0.8
Putaendo	0.0	5.1	5.1	4.5	0.3
Llailay	0.0	7.5	7.5	6.1	0.5
Puchuncavi	0.0	2.4	2.4	2.3	0.1
Quillota	0.2	28.1	27.1	17.7	4.1
Catemu	0.0	23.8	23.2	15.5	3.2
Los Andes	0.0	0.7	0.7	0.7	0.0
San Antonio	0.0	8.3	8.3	6.7	0.6
San Felipe	0.0	8.3	8.3	6.7	0.6
Gran Santiago	2462.7	2386.8	2386.8	2579.9	2389.4
Rancagua	540.0	1313.2	1214.5	911.3	706.8
Requinoa	28.1	958.0	752.9	466.3	225.2
Rengo	922.8	2224.6	1630.9	1089.4	711.2
San Fernando	21.0	692.6	574.5	354.0	151.4
San Vicente	0.0	235.3	226.0	146.2	35.2
Cauquenes	0.0	1.8	1.8	1.4	0.2
Constitucion	0.0	0.1	0.1	0.1	0.0
Curico	97.6	21.6	21.6	20.4	15.9
Linares	97.6	21.6	21.6	20.4	15.9
Talca	80.4	69.6	50.8	34.6	23.6
Chillan	66.8	23.1	21.4	14.4	8.3
Gran Concepcion	0.0	133.1	116.8	72.1	25.6
Arauco	0.0	4.1	3.9	2.8	0.6
Codegua	395.5	1631.2	1217.8	786.9	466.7
Los Angeles	7.5	20.5	16.7	10.4	4.7
San Carlos	7.5	20.5	16.7	10.4	4.7
Angol	7.5	20.5	16.7	10.4	4.7
Nueva Imperial	7.5	20.5	16.7	10.4	4.7
Gran Temuco	108.2	99.4	72.2	51.2	37.8
Osorno	76.4	77.8	56.7	39.1	27.4
Puerto Montt	7.5	20.5	16.7	10.4	4.7
Valdivia	7.5	20.5	16.7	10.4	4.7
Coihaique	30.5	114.1	82.9	59.8	45.4
Punta Arenas	0.0	0.1	0.1	0.1	0.0

Fuente: Elaboración propia.

Gran Santiago, Gran Concepción, Temuco, Talca y Gran Valparaíso son las ciudades que obtienen el mayor beneficio social para las cuatro alternativas de norma evaluadas en ambos escenarios de beneficio analizados.

Con respecto a los costos, las ciudades Gran Santiago, Rengo, Rancagua, Codegua y Requínoa son las que presentan los mayores costos para ambos escenarios (alto y bajo).

## **Anexo XV. Memoria de Cálculo**

Los cálculos detallados de los costos de reducción de  $PM_{2.5}$  por fuente, así como las medidas asignadas a cada una de las fuentes de aquellas ciudades que cuentan con inventario, se adjuntan en la copia digital de este documento.

## **Anexo XVI. Detalle de Fuentes**

El detalle de las fuentes emisoras utilizadas en el Estudio se adjuntan en la copia digital de este documento.