

001009

Estudio

**RELACIÓN DE LA NORMA DE CALIDAD PRIMARIA MP 2,5 CON LA
NORMA DE CALIDAD PRIMARIA DE MP 10**

Informe Final

Reporte Preparado por Luis Abdón Cifuentes para la Comisión Nacional del
Medio Ambiente

2 de Julio de 2010

Equipo de Trabajo

Luis Abdón Cifuentes, Ingeniero Civil Estructural
Ph.D. en Ingeniería y Políticas Públicas

Nicolás Borchers, Ingeniero Civil Industrial Ambiental

Camila Cabrera, Ingeniero Civil Industrial Ambiental

Jorge Gómez, Ingeniero Civil Ambiental

Mayo Rodríguez, Ingeniero Civil Industrial Ambiental

Presentación

El presente informe corresponde al Informe 2 del Estudio “Relación de la norma de calidad primaria MP_{2,5} con la norma de calidad primaria de MP₁₀”. El informe sigue la estructura del documento final que debe preparar la Comisión Nacional del Medio Ambiente.

Tabla de Contenidos

Presentación	3
Tabla de Contenidos	4
Tablas	7
Figuras	13
1 INTRODUCCIÓN	14
1.1 ANTECEDENTES NORMATIVOS	15
1.1.1 Marco legal que establece el requisito de elaborar un AGIES.	15
1.1.2 Antecedentes de la norma y del proceso normativo	16
1.1.3 Fundamentos para la dictación de la norma	20
2 METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN	22
2.1 Establecimiento de la Línea Base	23
2.1.1 Situación Actual del Material Particulado en Chile.	24
2.1.2 Proyección de población afectada	28
2.2 Cuantificación de Beneficios	29
2.2.1 Identificación de Impactos	30
2.2.2 Cuantificación de Impactos.....	32
2.2.3 Valoración de Impactos	40
2.3 Cuantificación de Costos	43
2.3.1 Relación Emisión Concentración.....	43
2.3.2 Curvas de Costo.....	45
2.3.3 Proyección de las Curvas de Costos	48

2.3.4	Costos de Monitoreo	48
2.3.5	Costos de declaración zona saturada.....	49
3	RESULTADOS	50
4	ANÁLISIS DE LOS NIVELES DE EPISODIOS CRÍTICOS	55
4.1	Introducción	55
4.1.1	Relación entre norma diaria y norma anual	55
4.1.2	Medidas de Gestión de Episodios Críticos	56
4.2	Método	58
4.2.1	Supuestos Generales	58
4.2.2	Cálculo de los beneficios de un día de episodio crítico	59
4.2.3	Determinación del número de días esperado de episodios críticos.....	60
4.3	Análisis Medidas de GEC.....	62
4.3.1	Medida 1: Restricción Vehicular para Vehículos Livianos.....	62
4.3.2	Medida 2: Paralización de Fuentes Fijas	65
4.3.3	Medida 3: Prohibición funcionamiento estufas a leña	70
4.4	Resultados Medidas GEC.....	76
4.4.1	Reducción de Emisiones	77
4.4.2	Indicadores económicos.....	81
5	ANÁLISIS DE LA CONVENIENCIA DE MANTENER LA NORMA ANUAL DE MP10	89
5.1	Estrategias a seguir para derogar la Norma de MP 10.....	100
5.1.1	Materias que requieren de un análisis más profundo.....	101
6	CONCLUSIONES.....	103

7	REFERENCIAS	109
8	ANEXOS	113
8.1	Caso Base: Determinación de la Norma Activa y de la reducción de concentraciones requerida.....	113
8.2	Inventarios de emisiones utilizados.....	116
8.3	Conformación de Material Particulado Secundario.	117
8.4	Asignación de Medidas por Fuente Emisora.....	119
8.5	Asignación de Curvas de Costo por Ciudad.	122
8.6	Cálculo de Emisiones Efectivas y Reducciones por Medida.....	124
8.7	Principales resultados AGIES para todas las alternativas evaluadas	125
8.8	Elicitación de expertos	130
8.8.1	Protocolo de Elicitación	130
8.9	Medidas GEC	140
8.9.1	Zonas analizadas en el análisis de norma diaria.....	140
8.9.2	FCE utilizados en el análisis de GEC.....	141
8.9.3	Restricción Vehicular	142
8.9.4	Prohibición funcionamiento estufas a leña.....	143
8.10	Derogación norma anual MP ₁₀	156
8.10.1	Casos evitados, beneficios y costos totales	156
8.10.2	Lista de expertos a elicitar	158

Tablas

Tabla 1-1 Límites Propuestos para la Norma de Calidad Primaria para MP2,5 en el Aire.	19
Tabla 1-2 Niveles que Determinan Situaciones de Emergencia Ambiental para MP _{2,5}	20
Tabla 2-1 Promedio Anual de Concentraciones de Material Particulado por Área Metropolitana.....	25
Tabla 2-2 Ciudades Sin Información y concentración anual de MP ₁₀ asignada.	27
Tabla 2-3 Beneficios identificados y valorados como Costos Evitados.	31
Tabla 2-4 Reducciones Requeridas por Ciudad de MP _{2,5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	35
Tabla 2-5 Resumen de Coeficientes de Funciones E-R para Material Particulado.	37
Tabla 2-6 Resumen de Coeficientes de Funciones C-R para Material Particulado.	39
Tabla 2-7 Estimaciones del VVE en Santiago por medio del método de valoración contingente (UF por vida estadística).....	41
Tabla 2-8 Factores Emisión-Concentración (FEC) para MP _{2,5} utilizados en el presente estudio ((ton/año)/($\mu\text{g}/\text{m}^3$))......	45
Tabla 2-9 Resultados Ajuste Cúbico a Curvas de Costo.	46
Tabla 2-10 Número de Ciudades Declaradas como Zona Saturada por Alternativa Evaluada y Valor Presente de los Costos para Zona Saturada.....	49
Tabla 3-1 Casos Totales Evitados en el Período 2012-2041 (Miles de casos) y Costos en (MMUSD)	51
Tabla 3-2 Aumento de esperanza de vida para toda la población según norma (meses).....	51
Tabla 3-3 Valor presente de los costos y beneficios por período (percentil 50, Millones de US\$).....	52

Tabla 3-4 Costo de Reducción Anual por Periodo de Tiempo (Millones de USD por año).....	52
Tabla 3-5 VP Beneficio Neto de la Norma Propuesta para MP 2,5. (Millones de US\$)	52
Tabla 3-6 VP de los Beneficios y Costos distribuidos por Agente Económico. (Millones de US\$).....	53
Tabla 3-7 Distribución de Costos por Sector y Tipo de Fuente.....	54
Tabla 3-8 Valor Presente de Costos Distribuidos por Sector Emisor (Millones de US\$).....	54
Tabla 4-1 Medidas de control aplicadas según episodio crítico de calidad del aire en la RM	57
Tabla 4-2 Medidas de GEC consideradas en el análisis	58
Tabla 4-3 Beneficio unitario (USD/(ugPM25/m3)-día) para algunas zonas analizadas según escenario de evaluación.....	60
Tabla 4-4 Número Esperado de días con episodios críticos al año	61
Tabla 4-5 Número de dígitos paralizados según episodio	62
Tabla 4-6 Parque vehicular adicional (vehículo liviano particular) restringido por efecto de la restricción vehicular para GEC (veh/día) y parque total por ciudad ..	64
Tabla 4-7 Costo de paralización unitario en un episodio crítico para las distintas zonas consideradas, año 2010.	67
Tabla 4-8 Emisiones PM ₁₀ diarias totales (kg/día) según zona analizada.....	68
Tabla 4-9 Reducción de emisiones de los contaminantes relevantes (ton/día) para un día de episodio crítico según zona analizada.	69
Tabla 4-10 Categorización artefactos a leña.....	72
Tabla 4-11 Proyección de artefactos que utilizan leña que paralizarán para algunas de las zonas analizadas en episodios críticos.	73
Tabla 4-12 Distribución equipos de reemplazo de calefactores a leña durante episodios críticos.....	74

Tabla 4-13 Costo de combustible por tipo de tecnología (CLP/estufa-día).....	74
Tabla 4-14 Costo unitario de paralización en un episodio crítico para distintas zonas consideradas (\$ CLP/ (día * equipo)).....	75
Tabla 4-15 Reducción de Emisión diaria de MP _{2,5} promedio por tipo de artefacto por día de episodio crítico para algunas zonas consideradas (kg/estufa-día).....	76
Tabla 4-16 Reducción de emisiones de MP _{2,5} por día de episodio crítico para la prohibición de estufas a leña (ton/día). Año 2012.	77
Tabla 4-17 Reducción de emisiones de MP _{2,5} por día de episodio crítico y tipo de contaminante para paralización de fuentes fijas (ton/día). Año 2012.....	78
Tabla 4-18 Reducción de emisiones, debidas a la restricción vehicular, por tipo de contaminante y episodio (ton/día). Año 2012.	79
Tabla 4-19 Porcentajes de reducción de emisión por contaminante con respecto al total de emisiones de la ciudad. Año 2012.....	80
Tabla 4-20 Indicadores económicos unitarios para un episodio de Alerta Ambiental, año 2012.....	82
Tabla 4-21 Indicadores económicos unitarios para un episodio de Preemergencia Ambiental, año 2012.....	83
Tabla 4-22 Indicadores económicos unitarios para un episodio de Emergencia Ambiental, año 2012.....	85
Tabla 4-23 Valor presente (VP) de beneficios y costos según episodio crítico y medida GEC.	87
Tabla 5-1 Casos evitados de mortalidad largo plazo, Valor Presente de Costos y Beneficios según zona del país, para el primer periodo de implementación (2012-2021), para diferentes escenarios de normas de MP _{2,5} y MP ₁₀ (Millones de US\$). 92	
Tabla 5-2 Costo y Beneficio total de cumplimiento de la norma de MP _{2,5} , versus la concentración promedio nacional de MP _{2,5} , para el año 2012. (Millones de US\$) ...	97
Tabla 5-3 Costo y Beneficio total de cumplimiento de la norma de MP ₁₀ , versus la concentración promedio nacional de MP _{2,5} , para el año 2012. (Millones de US\$) ...	97

Tabla 5-4: Casos evitados totales en el primer periodo de implementación (2012-2021), para diferentes escenarios de normas de MP2,5 y MP10.	99
Tabla 5-5 Gaps de información y estudios recomendados.....	102
Tabla 8-1 Inventarios de emisiones.....	116
Tabla 8-2 Relaciones Consideradas entre los Contaminantes Primarios y Secundarios.....	118
Tabla 8-3 Medidas aplicadas en el AGIES del PPDA de la RM, para Fuentes Móviles.....	119
Tabla 8-4 Medida Aplicada por Fuentes Fijas.	120
Tabla 8-5 Medidas aplicadas para Fuentes Fugitivas.....	121
Tabla 8-6 Curvas de costo asignadas.....	122
Tabla 8-7 Curvas de costo asignadas (Continuación).....	123
Tabla 8-8 Alternativas de norma evaluadas ($\mu\text{g}/\text{m}_3$ promedio anual).....	125
Tabla 8-9 Número de Ciudades Declaradas como Zona Saturada por Alternativa Evaluada y Valor Presente de los Costos para Zona Saturada.....	125
Tabla 8-10 Casos Totales Evitados en el Período 2012-2041 (Miles de casos).....	126
Tabla 8-11 Esperanza de Vida por Alternativa de Norma.....	126
Tabla 8-12 Valor presente de los costos y beneficios por período (percentil 50, Millones de US\$).....	126
Tabla 8-13 Costo de Reducción Anual por Periodo de Tiempo (Millones de USD por año).....	127
Tabla 8-14 VP Beneficio Neto de la norma (Millones de US\$).....	127
Tabla 8-15 VP de los Beneficios y Costos distribuidos por agente económico (Millones de US\$).....	128
Tabla 8-16 Distribución de costos por alternativa de norma y sector.....	129
Tabla 8-17 Valor Presente de Costos Distribuidos por Sector Emisor (Millones de US\$).....	129
Tabla 8-18 Lista de estudios entregados a expertos.....	130

Estudio

**RELACIÓN DE LA NORMA DE CALIDAD PRIMARIA MP 2,5 CON LA
NORMA DE CALIDAD PRIMARIA DE MP 10**

Informe Final

Reporte Preparado por Luis Abdón Cifuentes para la Comisión Nacional del
Medio Ambiente

2 de Julio de 2010

Equipo de Trabajo

Luis Abdón Cifuentes, Ingeniero Civil Estructural
Ph.D. en Ingeniería y Políticas Públicas

Nicolás Borchers, Ingeniero Civil Industrial Ambiental

Camila Cabrera, Ingeniero Civil Industrial Ambiental

Jorge Gómez, Ingeniero Civil Ambiental

Mayo Rodríguez, Ingeniero Civil Industrial Ambiental

Presentación

El presente informe corresponde al Informe 2 del Estudio "Relación de la norma de calidad primaria MP_{2,5} con la norma de calidad primaria de MP₁₀". El informe sigue la estructura del documento final que debe preparar la Comisión Nacional del Medio Ambiente.

Tabla de Contenidos

Presentación	3
Tabla de Contenidos	4
Tablas	7
Figuras	13
1 INTRODUCCIÓN	14
1.1 ANTECEDENTES NORMATIVOS	15
1.1.1 Marco legal que establece el requisito de elaborar un AGIES.	15
1.1.2 Antecedentes de la norma y del proceso normativo.....	16
1.1.3 Fundamentos para la dictación de la norma.....	20
2 METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN	22
2.1 Establecimiento de la Línea Base	23
2.1.1 Situación Actual del Material Particulado en Chile.	24
2.1.2 Proyección de población afectada.....	28
2.2 Cuantificación de Beneficios	29
2.2.1 Identificación de Impactos.....	30
2.2.2 Cuantificación de Impactos.....	32
2.2.3 Valoración de Impactos.....	40
2.3 Cuantificación de Costos	43
2.3.1 Relación Emisión Concentración.....	43
2.3.2 Curvas de Costo.....	45
2.3.3 Proyección de las Curvas de Costos.....	48

2.3.4	Costos de Monitoreo	48
2.3.5	Costos de declaración zona saturada.....	49
3	RESULTADOS	50
4	ANÁLISIS DE LOS NIVELES DE EPISODIOS CRÍTICOS	55
4.1	Introducción	55
4.1.1	Relación entre norma diaria y norma anual	55
4.1.2	Medidas de Gestión de Episodios Críticos	56
4.2	Método	58
4.2.1	Supuestos Generales	58
4.2.2	Cálculo de los beneficios de un día de episodio crítico	59
4.2.3	Determinación del número de días esperado de episodios críticos.....	60
4.3	Análisis Medidas de GEC.....	62
4.3.1	Medida 1: Restricción Vehicular para Vehículos Livianos.....	62
4.3.2	Medida 2: Paralización de Fuentes Fijas	65
4.3.3	Medida 3: Prohibición funcionamiento estufas a leña	70
4.4	Resultados Medidas GEC.....	76
4.4.1	Reducción de Emisiones.....	77
4.4.2	Indicadores económicos.....	81
5	ANÁLISIS DE LA CONVENIENCIA DE MANTENER LA NORMA ANUAL DE MP10	89
5.1	Estrategias a seguir para derogar la Norma de MP 10.....	100
5.1.1	Materias que requieren de un análisis más profundo.....	101
6	CONCLUSIONES.....	103

7	REFERENCIAS	109
8	ANEXOS.....	113
8.1	Caso Base: Determinación de la Norma Activa y de la reducción de concentraciones requerida.....	113
8.2	Inventarios de emisiones utilizados.....	116
8.3	Conformación de Material Particulado Secundario.....	117
8.4	Asignación de Medidas por Fuente Emisora.....	119
8.5	Asignación de Curvas de Costo por Ciudad.....	122
8.6	Cálculo de Emisiones Efectivas y Reducciones por Medida.....	124
8.7	Principales resultados AGIES para todas las alternativas evaluadas	125
8.8	Elicitación de expertos	130
8.8.1	Protocolo de Elicitación	130
8.9	Medidas GEC	140
8.9.1	Zonas analizadas en el análisis de norma diaria.....	140
8.9.2	FCE utilizados en el análisis de GEC.....	141
8.9.3	Restricción Vehicular	142
8.9.4	Prohibición funcionamiento estufas a leña.....	143
8.10	Derogación norma anual MP ₁₀	156
8.10.1	Casos evitados, beneficios y costos totales	156
8.10.2	Lista de expertos a elicitar	158

Tablas

Tabla 1-1 Límites Propuestos para la Norma de Calidad Primaria para MP _{2,5} en el Aire.	19
Tabla 1-2 Niveles que Determinan Situaciones de Emergencia Ambiental para MP _{2,5}	20
Tabla 2-1 Promedio Anual de Concentraciones de Material Particulado por Área Metropolitana.....	25
Tabla 2-2 Ciudades Sin Información y concentración anual de MP ₁₀ asignada.....	27
Tabla 2-3 Beneficios identificados y valorados como Costos Evitados.	31
Tabla 2-4 Reducciones Requeridas por Ciudad de MP _{2,5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	35
Tabla 2-5 Resumen de Coeficientes de Funciones E-R para Material Particulado.	37
Tabla 2-6 Resumen de Coeficientes de Funciones C-R para Material Particulado.	39
Tabla 2-7 Estimaciones del VVE en Santiago por medio del método de valoración contingente (UF por vida estadística).....	41
Tabla 2-8 Factores Emisión-Concentración (FEC) para MP _{2,5} utilizados en el presente estudio ((ton/año)/($\mu\text{g}/\text{m}^3$))......	45
Tabla 2-9 Resultados Ajuste Cúbico a Curvas de Costo.	46
Tabla 2-10 Número de Ciudades Declaradas como Zona Saturada por Alternativa Evaluada y Valor Presente de los Costos para Zona Saturada.	49
Tabla 3-1 Casos Totales Evitados en el Período 2012-2041 (Miles de casos) y Costos en (MMUSD)	51
Tabla 3-2 Aumento de esperanza de vida para toda la población según norma (meses).....	51
Tabla 3-3 Valor presente de los costos y beneficios por período (percentil 50, Millones de US\$).....	52

Tabla 3-4 Costo de Reducción Anual por Periodo de Tiempo (Millones de USD por año)	52
Tabla 3-5 VP Beneficio Neto de la Norma Propuesta para MP 2,5. (Millones de US\$)	52
Tabla 3-6 VP de los Beneficios y Costos distribuidos por Agente Económico. (Millones de US\$).....	53
Tabla 3-7 Distribución de Costos por Sector y Tipo de Fuente.....	54
Tabla 3-8 Valor Presente de Costos Distribuidos por Sector Emisor (Millones de US\$).....	54
Tabla 4-1 Medidas de control aplicadas según episodio crítico de calidad del aire en la RM	57
Tabla 4-2 Medidas de GEC consideradas en el análisis	58
Tabla 4-3 Beneficio unitario (USD/(ugPM25/m3)-día) para algunas zonas analizadas según escenario de evaluación.....	60
Tabla 4-4 Número Esperado de días con episodios críticos al año	61
Tabla 4-5 Número de dígitos paralizados según episodio	62
Tabla 4-6 Parque vehicular adicional (vehículo liviano particular) restringido por efecto de la restricción vehicular para GEC (veh/día) y parque total por ciudad ..	64
Tabla 4-7 Costo de paralización unitario en un episodio crítico para las distintas zonas consideradas, año 2010.	67
Tabla 4-8 Emisiones PM ₁₀ diarias totales (kg/día) según zona analizada	68
Tabla 4-9 Reducción de emisiones de los contaminantes relevantes (ton/día) para un día de episodio crítico según zona analizada.	69
Tabla 4-10 Categorización artefactos a leña.....	72
Tabla 4-11 Proyección de artefactos que utilizan leña que paralizarán para algunas de las zonas analizadas en episodios críticos.	73
Tabla 4-12 Distribución equipos de reemplazo de calefactores a leña durante episodios críticos.....	74

Relación de la norma de calidad primaria MP 2,5 con la norma de calidad primaria de MP 10

Tabla 4-13 Costo de combustible por tipo de tecnología (CLP/ estufa-día).....	74
Tabla 4-14 Costo unitario de paralización en un episodio crítico para distintas zonas consideradas (\$ CLP/ (día * equipo)).....	75
Tabla 4-15 Reducción de Emisión diaria de MP _{2,5} promedio por tipo de artefacto por día de episodio crítico para algunas zonas consideradas (kg/ estufa-día).....	76
Tabla 4-16 Reducción de emisiones de MP _{2,5} por día de episodio crítico para la prohibición de estufas a leña (ton/ día). Año 2012.	77
Tabla 4-17 Reducción de emisiones de MP _{2,5} por día de episodio crítico y tipo de contaminante para paralización de fuentes fijas (ton/ día). Año 2012.....	78
Tabla 4-18 Reducción de emisiones, debidas a la restricción vehicular, por tipo de contaminante y episodio (ton/ día). Año 2012.	79
Tabla 4-19 Porcentajes de reducción de emisión por contaminante con respecto al total de emisiones de la ciudad. Año 2012.....	80
Tabla 4-20 Indicadores económicos unitarios para un episodio de Alerta Ambiental, año 2012.....	82
Tabla 4-21 Indicadores económicos unitarios para un episodio de Preemergencia Ambiental, año 2012.....	83
Tabla 4-22 Indicadores económicos unitarios para un episodio de Emergencia Ambiental, año 2012.....	85
Tabla 4-23 Valor presente (VP) de beneficios y costos según episodio crítico y medida GEC.....	87
Tabla 5-1 Casos evitados de mortalidad largo plazo, Valor Presente de Costos y Beneficios según zona del país, para el primer periodo de implementación (2012-2021), para diferentes escenarios de normas de MP _{2,5} y MP ₁₀ (Millones de US\$). 92	
Tabla 5-2 Costo y Beneficio total de cumplimiento de la norma de MP _{2,5} , versus la concentración promedio nacional de MP _{2,5} , para el año 2012. (Millones de US\$) ...	97
Tabla 5-3 Costo y Beneficio total de cumplimiento de la norma de MP ₁₀ , versus la concentración promedio nacional de MP _{2,5} , para el año 2012. (Millones de US\$) ...	97

Tabla 5-4: Casos evitados totales en el primer periodo de implementación (2012-2021), para diferentes escenarios de normas de MP2,5 y MP10.	99
Tabla 5-5 Gaps de información y estudios recomendados.....	102
Tabla 8-1 Inventarios de emisiones.....	116
Tabla 8-2 Relaciones Consideradas entre los Contaminantes Primarios y Secundarios.....	118
Tabla 8-3 Medidas aplicadas en el AGIES del PPDA de la RM, para Fuentes Móviles.....	119
Tabla 8-4 Medida Aplicada por Fuentes Fijas.	120
Tabla 8-5 Medidas aplicadas para Fuentes Fugitivas.....	121
Tabla 8-6 Curvas de costo asignadas	122
Tabla 8-7 Curvas de costo asignadas (Continuación)	123
Tabla 8-8 Alternativas de norma evaluadas ($\mu\text{g}/\text{m}_3$ promedio anual)	125
Tabla 8-9 Número de Ciudades Declaradas como Zona Saturada por Alternativa Evaluada y Valor Presente de los Costos para Zona Saturada.	125
Tabla 8-10 Casos Totales Evitados en el Período 2012-2041 (Miles de casos).....	126
Tabla 8-11 Esperanza de Vida por Alternativa de Norma	126
Tabla 8-12 Valor presente de los costos y beneficios por período (percentil 50, Millones de US\$).....	126
Tabla 8-13 Costo de Reducción Anual por Periodo de Tiempo (Millones de USD por año)	127
Tabla 8-14 VP Beneficio Neto de la norma (Millones de US\$).....	127
Tabla 8-15 VP de los Beneficios y Costos distribuidos por agente económico (Millones de US\$).....	128
Tabla 8-16 Distribución de costos por alternativa de norma y sector.....	129
Tabla 8-17 Valor Presente de Costos Distribuidos por Sector Emisor (Millones de US\$).....	129
Tabla 8-18 Lista de estudios entregados a expertos.....	130

Tabla 8-19 Lista de ciudades consideradas en el análisis de la norma diaria de MP _{2,5}	140
Tabla 8-20 FCE-EC utilizados en el presente estudio según episodio (ton/(ug/m ³)/año).	141
Tabla 8-21 Parámetros utilizados para el cálculo de ahorro de combustible.....	142
Tabla 8-22 Parámetros utilizados para el cálculo del costo de la restricción vehicular.....	143
Tabla 8-23 Artefactos para calefacción en uso que utilizan leña al año 2006.....	144
Tabla 8-24 Categorización artefactos a leña.....	145
Tabla 8-25 Distribución del parque base en el año 2006 considerado en el análisis de la medida	146
Tabla 8-26 Ventas de Artefactos Nuevos año 2006.....	147
Tabla 8-27 Ventas de Artefactos Nuevos año 2010.....	148
Tabla 8-28 Composición Ventas de artefactos nuevos	148
Tabla 8-29 Proyección del parque de artefactos que utilizan leña para cada una de las regiones analizadas. (Miles de artefactos).....	149
Tabla 8-30 Distribución equipos de reemplazo de calefactores durante episodios críticos.....	150
Tabla 8-31 Consumo, precio y costo de combustible por tipo de tecnología (CLP/estufa-día) para la ciudad de Santiago.....	151
Tabla 8-32 Costo unitario de paralización en un episodio crítico para distintas zonas consideradas (\$ CLP/ (día * equipo)).....	152
Tabla 8-33 Precio y vida útil de artefactos de respaldo (CLP)	152
Tabla 8-34 Consumo de Leña promedio por tipo de artefacto para algunas zonas analizadas (kg/ día - estufa).....	153
Tabla 8-35 Reducción de Emisión diaria de MP _{2,5} promedio por tipo de artefacto por día de episodio crítico para algunas zonas consideradas para el año 2012 (ug MP _{2,5} / día-artefacto).....	154

1024 VTA

Relación de la norma de calidad primaria MP 2,5 con la norma de calidad primaria de MP 10

Tabla 8-36 Casos evitados de mortalidad largo plazo, Valor Presente de Costos y Beneficios según zona del país, para el primer periodo de implementación (2012-2021), para diferentes escenarios de normas de MP2,5 y MP10 (Millones de US\$).

.....	157
Tabla 8-37 Lista de expertos a elicitar	158

Figuras

Figura 2-1 Esquema del Método de la Función de Daño..... 30

Figura 2-2 Curva de Costos Totales de reducción de MP2,5 para ciudades analizadas, año 2012..... 47

Figura 3-1 Exposición de la Población Chilena a MP_{2,5}..... 50

Figura 8-1 Aumento de riesgo de mortalidad por exposición a MP_{10-2,5}..... 132

Figura 8-2 Ejemplo de causalidad sin anclaje..... 134

Figura 8-3 Ejemplo de causalidad con anclaje..... 134

Figura 8-4 Relación entre mortalidad asociada a exposición de largo plazo y de corto plazo 135

Figura 8-5 Ejemplo de concentración-respuesta 136

Figura 8-6 Evolución de normas nacionales para MP₁₀ y MP_{2,5} 137

1 INTRODUCCIÓN

El presente documento se elabora como requisito al proceso de dictación de la Norma de Calidad Primaria para Material Particulado 2,5 (NCP MP_{2,5}), siguiendo lo establecido en la Ley de Bases Generales para el Medio Ambiente (Ley N°19.300) y en el Reglamento para la Dictación de Normas de Calidad Ambiental y de Emisión (Decreto 93 de 1995). En su contenido, se presenta el Análisis General del Impacto Económico y Social (AGIES) del proyecto de norma para material particulado fino (MP_{2,5}).

Los temas abordados en el AGIES se analizan en cuatro secciones, presentadas en el siguiente orden: la primera sección, describe los antecedentes normativos que sustentan la propuesta de norma, la segunda sección, se encarga de abordar la metodología general empleada en la realización de la evaluación económica de los impactos generados, específicamente, la línea de base desarrollada y los supuestos considerados en la elaboración de los análisis de costos y beneficios atribuibles a la implementación del proyecto de norma. En una tercera sección se muestran los resultados y conclusiones de la evaluación realizada a la norma. Finalmente, se presentan algunas recomendaciones y justificaciones que apoyarán la toma de decisiones respecto de la mejora en la eficiencia de la norma, la mejor manera de lograr objetivos y la minimización de los impactos sociales no deseados.

Adicionalmente los capítulos 4 y 0 de este documento contienen la cuantificación de costos y beneficios de la gestión de episodios críticos (GEC) y el análisis de la conveniencia de mantener la norma de MP₁₀ en conjunto con la de MP_{2,5}.

1.1 ANTECEDENTES NORMATIVOS

1.1.1 Marco legal que establece el requisito de elaborar un AGIES.

A partir de 1994, la Ley 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente, señala que para todas las normas de calidad y emisión, *“un reglamento establecerá el procedimiento a seguir para la dictación de normas...”*. Además, dicho reglamento debe considerar como mínimo el desarrollo de estudios científicos, consultas a organismos competentes (tanto públicos como privados), análisis técnicos y económicos y respuestas a las observaciones formuladas por la ciudadanía.

Por su parte, en 1995 el Ministerio Secretaría General de la Presidencia decreta el D.S. N° 93, Reglamento para la Dictación de Normas de Calidad Ambiental y de Emisión, estableciendo en su Artículo 15, que una vez *“Elaborado el anteproyecto de norma, el Director encargará un análisis general del impacto económico y social de la o las normas contenidas en dicho anteproyecto”*. Estableciendo específicamente que se deberán *“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.”*

De esta manera, queda estipulado legalmente el requerimiento de un estudio AGIES para cada que pretenda dictarse a nivel nacional. La CONAMA, a través de dicho estudio, presenta los antecedentes que sustentan sus argumentos para proponer proyectos de normas de calidad y emisión, con beneficios para el medio ambiente y para la sociedad.

1.1.2 Antecedentes de la norma y del proceso normativo

1.1.2.1 *Importancia de Regular el Material Particulado Fino (MP_{2,5})*

De acuerdo con la Ley de Bases Generales del Medio Ambiente, es deber del Estado dictar normas para regular la presencia de contaminantes en el medio ambiente, de manera de prevenir que éstos puedan significar o representar, por sus niveles, concentraciones y periodos, un riesgo para la salud de las personas.

El material particulado, para efectos regulatorios, se clasifica según su diámetro aerodinámico, debido, principalmente, a que la probabilidad y el depósito en el tracto respiratorio, están determinados por el tamaño de las partículas.

Internacionalmente, son reconocidas dos medidas de diámetro del material particulado objeto de regulación: el MP₁₀ y MP_{2,5}.¹ En el MP₁₀, se puede distinguir una fracción gruesa, entre 2,5 y 10 micrones y una fracción fina, que considera las partículas menores a 2,5 micrones (conocido como MP_{2,5}). La fracción fina, está compuesta por partículas suficientemente pequeñas, para penetrar en las vías respiratorias hasta llegar a los pulmones y los alvéolos.

El MP_{2,5} se produce por emisiones directas de los procesos de combustión de combustibles fósiles, a partir de la condensación de gases, de reacciones químicas en la atmósfera a partir de gases precursores como el dióxido de azufre, óxidos de

¹ Partículas de diámetro 10 y 2,5 micrones.

nitrógeno, compuestos orgánicos volátiles, amoníaco, y otros compuestos; y a través de procesos de nucleación y coagulación de partículas ultrafinas.²

En ese contexto, las principales fuentes del MP_{2,5} son los automóviles, buses y camiones, tanto a diesel como a gasolina, plantas termoeléctricas, calderas, procesos industriales, hornos, fundiciones, procesos metalúrgicos, la combustión de biomasa, tal como la calefacción residencial a leña, quemas agrícolas, forestales y emisiones de amonio de las operaciones agrícolas.³

Como efectos del MP_{2,5}, se han identificado impactos y riesgos en salud, tales como: mortalidad y admisiones hospitalarias en pacientes con enfermedad pulmonar obstructiva crónica y con enfermedad cardiovascular, incremento en la incidencia de infecciones y cáncer respiratorio, inflamación pulmonar y sistémica, exacerbación de los síntomas e incremento del asma, aumento de riesgo de infartos al miocardio, disfunciones endoteliales y vasculares, y desarrollo de aterosclerosis.

De igual manera, el material particulado fino puede presentar efectos adicionales tales como efectos a la visibilidad, debido a sus propiedades de absorción y refracción de luz, efectos sobre la vegetación y sobre los materiales.

1.1.2.2 Proceso de Dictación de la NCP para MP_{2,5}.

La Norma Primaria para Material Particulado (MP_{2,5}), se incorporó al Cuarto Programa Priorizado de Normas en el año de 1999, bajo el Acuerdo N° 99 del

² Las partículas que se forman en la atmósfera constituyen lo que se conoce como aerosol secundario, o partículas secundarias.

³ Las partículas finas tienen un tiempo de residencia en la atmósfera más largo, lo que hace que éstas puedan transportarse largas distancias, impactando a escala regional.

Consejo Directivo de CONAMA. El proceso de Dictación de esta Norma Primaria de Calidad (NPC), se inicia en Julio del año 2000, bajo resolución Exenta N° 710 de la Directora Ejecutiva de CONAMA y el proceso formal de elaboración de Anteproyecto se inicia el 7 de Agosto del año 2000. En el desarrollo del proceso, la presentación del anteproyecto de norma ha considerado ocho ampliaciones de plazo,⁴ publicándose finalmente en el Diario Oficial el día 17 de Agosto de 2009 el Anteproyecto Definitivo de NCP para Material Particulado Fino Respirable (MP_{2,5}) y dándose inicio, simultáneamente, al proceso de consulta pública.

1.1.2.3 Descripción del Anteproyecto de Norma

El objetivo propuesto por el Anteproyecto para el establecimiento de la Norma Primaria de Calidad Ambiental para Material Particulado Fino Respirable, MP_{2,5}, es proteger la salud de las personas, de los efectos agudos y crónicos de dicho contaminante, con un nivel de riesgo aceptable, estableciendo los límites de concentración en el aire para Material Particulado Respirable Fino MP_{2,5}.

Para tal efecto, se proponen límites de concentración diarios y anuales, de MP_{2,5}, aplicables en forma gradual por periodos de diez años, iniciando en el año 2012.

Los límites propuestos en la norma para las concentraciones anuales y de 24 horas, se indican a continuación:

⁴ Resoluciones Exentas N°22/01, N°15/04, N°3708/06, N°1818/07, N°1293/08, N°3913/08, N°1004/09 y N°2320/09. Los motivos de extensión de plazo aluden, por lo general, a la falta de antecedentes para el establecimiento de valores norma, referidos a ausencia de información sobre el estado de la contaminación por MP_{2,5}, poca experiencia Internacional en la regulación de este contaminante y el análisis de la factibilidad de controlar y reducir el MP_{2,5} mediante la norma para MP₁₀.

Relación de la norma de calidad primaria MP 2,5 con la norma de calidad primaria de MP 10

Tabla 1-1 Límites Propuestos para la Norma de Calidad Primaria para MP2,5 en el Aire.

NORMA MP _{2,5}	Año 2012	Año 2022	Año 2032
Límite de Concentración de 24 horas ($\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$)	63	50	25
Límite de Concentración anual ($\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$)	25	20	10

Fuente: Artículo 3°, Anteproyecto de Norma. Resolución Exenta N°4624, Agosto de 2009

La norma será sobrepasada si se evidencias las siguientes situaciones para el límite diario y anual:⁵

Límite Diario: Cuando el promedio aritmético, de tres años sucesivos, del percentil 98 de los promedios diarios, sea mayor al límite de concentración de 24 horas indicando, en cualquier estación monitora clasificada como EMRP.

Límite Anual: Cuando la concentración promedio trianual de los promedios anuales sea mayor al límite indicado, en cualquier estación monitora clasificada como EMRP.

En cuanto a las situaciones que determinan una Emergencia Ambiental para MP_{2,5}, el anteproyecto de norma establece rangos de concentración diaria y niveles de emergencia, según se muestran a continuación.

⁵ El anteproyecto aclara, en su Artículo 4°, que si el periodo de medición en una estación monitora no comenzare el 1° de Enero, se considerarán los tres primeros periodos de 12 meses a partir del mes de inicio de las mediciones, hasta disponer de tres años calendarios sucesivos de mediciones.

Relación de la norma de calidad primaria MP 2,5 con la norma de calidad primaria de MP 10

Tabla 1-2 Niveles que Determinan Situaciones de Emergencia Ambiental para MP_{2,5}.

Nivel	Concentración 24 horas MP _{2,5} (µg/m ³ N)		
	Año 2012	Año 2022	Año 2032
Alerta	97	88	69
Preemergencia	132	125	113
Emergencia	200	200	200

Fuente: Artículo 5º, Anteproyecto de Norma. Resolución Exenta N°4624, Agosto de 2009.

Las concentraciones deben ser obtenidas a partir de una metodología de pronóstico de calidad de aire, ó de la constatación de las emisiones de MP_{2,5}, provenientes de alguna estación de monitoreo de representatividad poblacional.⁶

Finalmente, el anteproyecto establece que la coordinación de los diversos servicios públicos, respecto del control de episodios críticos, corresponderá a las Comisiones Regionales del Medio Ambiente (COREMA). De igual manera, establece que las actividades de fiscalización de la norma corresponderán a la Autoridad Sanitaria, quien deberá poner a disposición de la ciudadanía los datos de los niveles de concentración de calidad del aire para MP_{2,5} correspondientes a la norma propuesta y emisiones de MP_{2,5} primario y sus precursores (SO₂, NO_x y NH₃), pues estos serán de dominio público.

1.1.3 Fundamentos para la dictación de la norma

Las regulaciones de material particulado, a nivel internacional, han evolucionado de normar material particulado total suspendido (PTS), a en 1987 normar MP₁₀, para luego considerar los límites máximos para concentraciones de MP_{2,5}, en 1997.

⁶ El Título VII del Anteproyecto, Metodología de Medición

Desde el año 2000 se han desarrollado, en el mundo, estudios sobre efectos del material particulado (MP) en las áreas de epidemiología, toxicología, evaluación de exposición y ciencias atmosféricas, que han profundizado el conocimiento de los riesgos que implica este contaminante para la salud humana.

La OMS basa sus valores guías de MP_{2,5}, en estudios epidemiológicos de cohorte de Estados Unidos que dan como resultado aumentos de riesgo de mortalidad de 6 % por cada 10 µg/m³ de MP_{2,5} para concentraciones anuales y de 1% de aumento de riesgo de muerte por cada 10 µg/m³ para concentraciones diarias.

En Chile, las concentraciones de MP_{2,5} de todas las áreas metropolitanas con mediciones presentan concentraciones anuales superiores al nivel propuesto por la OMS (10 µg/m³) para este contaminante. 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%. Lo anterior expone la importancia de regular este contaminante en beneficio de la salud de la población, razón por la cual, aunque en Chile actualmente existe una norma primaria de calidad ambiental para MP₁₀, se estudió y analizó la pertinencia de implementar una norma de calidad primaria que regule al MP_{2,5} en forma independiente⁷.

⁷ Como el PM₂MP_{2,5} está incluido dentro del PM₁₀MP₁₀, la regulación de esta última también regula indirectamente el PM₂MP_{2,5}. Sin embargo, esta regulación es afectada por la presencia de la fracción gruesa, PM₁₀MP_{10-2,5}.

2 METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN

Para efectos de la evaluación de los impactos económicos y sociales del proyecto normativo para MP_{2,5}, se aplicará la metodología de Análisis Costo Beneficio (ACB) como apoyo a la toma de decisiones. Este método, se sustenta en el concepto de Valor Económico Total (VET), y en las metodologías específicas desarrolladas para efectos de valorar y establecer los beneficios y costos de la aplicación de la NCP para MP_{2,5} que se propone.

En términos generales se buscará identificar, cuantificar y valorar los impactos evitados por la norma, sobre la salud de la población, la visibilidad del paisaje, las construcciones, entre otros, y determinar los costos asociados a dicho esfuerzo. En la contabilización de costos se incluyen los que deberá asumir el Estado en su labor de monitoreo y fiscalización de la norma.

El procedimiento utilizado en la evaluación económica presentada, respecto del impacto de la NCP para MP_{2,5}, comprende las siguientes etapas:

- a) Establecimiento de la línea base
- b) Cuantificación de beneficios
- c) Cuantificación de costo

2.1 Establecimiento de la Línea Base

La línea base corresponde a la situación actual y proyectada, de las concentraciones de MP_{2,5} bajo un escenario en que no se tome ninguna medida de reducción específica para MP_{2,5}, es decir, lo que se denomina el *escenario sin norma*. Dicho escenario, considera en la actualidad, el cumplimiento de la NCP para material particulado respirable MP₁₀, la cual no contempla una medida de reducción específica para la fracción fina del material particulado.

No obstante, para el análisis de beneficios, presentado en la siguiente sección, se realiza el ejercicio de evaluar la conveniencia de aplicar la norma de MP_{2,5} adicionalmente a la actual norma de MP₁₀. Para esto, se deben calcular el beneficio social neto de cada norma, y luego compararlos. Esto requiere analizar dos casos:

- a) El caso base, en que se mantiene la norma anual de MP₁₀ de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y se reduce la norma diaria de MP₁₀ de 150 a 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.
- b) El caso con proyecto, en que se mantienen los niveles anuales y diarios de la norma de MP₁₀ en 50 y 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente, y se agrega la norma de MP_{2,5}.

La evaluación económica contempla sólo evaluar los beneficios económicos de la propuesta de norma anual para MP_{2,5} y no considera la cuantificación de costos y beneficios de la gestión de episodios críticos (GEC)⁸. Se asume entonces que GEC es efectiva en cumplir la norma diaria de MP₁₀ base y la norma diaria de MP_{2,5} propuesta. Como el riesgo de mortalidad está asociado principalmente a exposición crónica la subestimación de beneficios no debiera ser importante.

⁸ Esta cuantificación se aborda en el capítulo 4

Para establecer la línea de base sobre la cual se evaluarán los costos y beneficios estimados de la implementación de la NCP para MP_{2,5}, se consideró la situación actual del Material Particulado en Chile y la población afectada y su proyección.

2.1.1 Situación Actual del Material Particulado en Chile.

Actualmente, gran parte del país presenta altas concentraciones de material particulado. El análisis para el material particulado fino (MP_{2,5}), refleja que la totalidad de las áreas para las que se tienen mediciones, presentan concentraciones anuales superiores al nivel propuesto por la Organización Mundial de la Salud -OMS (10 µg/m³).

Se consideró la información disponible de todas las ciudades o localidades que registran mediciones de MP₁₀ y MP_{2,5}, presentando el promedio de todos los monitores de cada ciudad, del año más actual disponible, y que corresponden a aglomeraciones urbanas con más de 40.000 habitantes.⁹ En esta clasificación califican a lo largo del territorio nacional, 13 ciudades de la zona Norte (Arica - Huasco) de las cuales 8 cuentan con mediciones de MP, 22 ciudades de la zona central (La Serena / Coquimbo - Constitución) de las cuales 15 tienen registros para MP y 17 ciudades de la zona sur (Curicó - Punta Arenas) de las que se tiene información sobre concentraciones de MP de solo 5 ciudades. Sólo 6 ciudades cuentan con mediciones de MP_{2,5}. En la siguiente tabla se resume las ciudades incluidas en el análisis con información de monitoreo.

⁹ Definición ciudad intermedia: MINVU, 2008.

Relación de la norma de calidad primaria MP 2,5 con la norma de calidad primaria de MP 10

Para las comunas sin información de concentraciones anuales de MP₁₀¹⁰, consideradas en el análisis, se les asignó un nivel de concentración de acuerdo a los siguientes criterios:

- a) 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/m³).
- b) 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/m³).
- c) 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/m³).

Las ciudades sin información que participan de esta asignación, se describen a continuación.

¹⁰ Luego mediante información del porcentaje de MP₁₀ que corresponde a partículas finas por zona del país se estimó la concentración de MP_{2,5} base.

Relación de la norma de calidad primaria MP 2,5 con la norma de calidad primaria de MP 10

Tabla 2-2 Ciudades Sin Información y concentración anual de MP₁₀ asignada.

Chañaral	13.959	25
Copiapó	133.054	25
La Serena-Coquimbo	666.211	25
Ovalle	101.100	25
Quintero	21.824	38
San Antonio	114.921	38
San Felipe	66.095	38
Cauquenes	42.482	38
Constitución	47.496	25
Los Ángeles	171.669	38
San Carlos	51.626	38
Angol	50.500	38
Nueva Imperial	41.289	38
Puerto Montt	181.339	38
Valdivia	144.874	38
Punta Arenas	123.164	25
Total	1.971.602	-

Fuente: Actualización DICTUC (2010) a Antecedentes AGIES CONAMA (2009)

Adicionalmente, para calcular los niveles de concentración respecto de la fracción fina MP_{2,5}, que serán asignados a las ciudades sin información, se trabaja con la fracción predominante de material particulado. Específicamente, se trabajan los datos de relaciones entre la fracción fina y gruesa, según las variaciones observadas de acuerdo a la zona del País.

Así por ejemplo, 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 cercana 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.

En cuanto a la información sobre las emisiones consideradas en este análisis, el total de emisiones provino de los inventarios de emisiones de cada una de las ciudades en dónde existía ésta información.¹¹

2.1.2 Proyección de población afectada

Los datos poblacionales fueron obtenidos del Instituto de Nacional de Estadística INE. La población considerada representa aproximadamente el 80% del país, lo que se considera razonable.

El crecimiento de la población fue proyectado al 2032 considerando las tasas de crecimiento poblacional del INE, dado que solo se encontraban disponibles las estadísticas de proyección hasta el 2020.

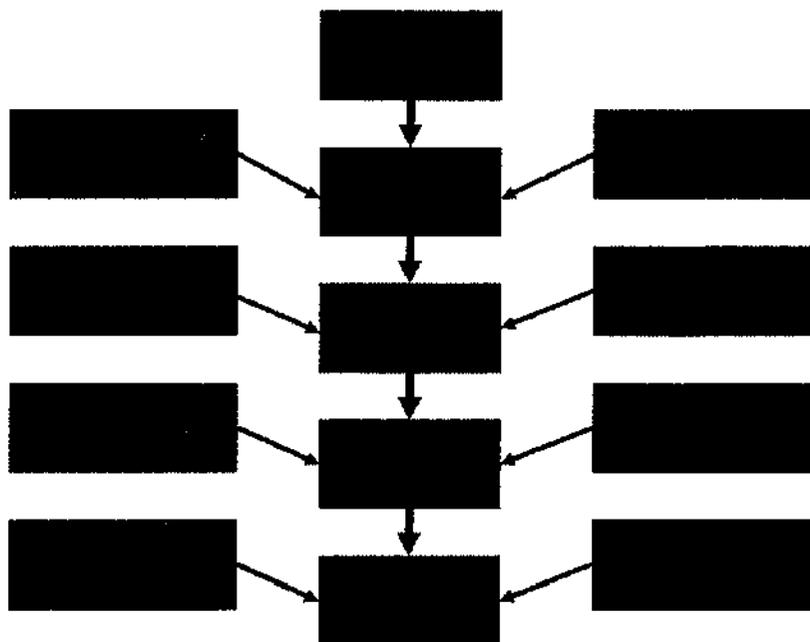
¹¹ Para mayor detalle de inventarios utilizados ver Anexo 5.2

2.2 *Cuantificación de Beneficios*

Una vez identificados los impactos negativos que previene la norma propuesta para material particulado fino, se deben cuantificar y valorar para estimar los beneficios. Esto es reconocido en la literatura como los “costos evitados”. La ocurrencia de estos costos evitados sólo es posible cuando los valores observados de la calidad del aire exceden, o excedan en el caso de proyectar la evolución futura de la calidad del aire, la norma propuesta.

El método tradicionalmente utilizado para estimar los costos evitados por una mejora en la calidad del aire corresponde al método de la función de daño. Este comprende una secuencia de 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, luego un modelo que estima el cambio en concentraciones ambientales resultante de los cambios en emisiones, luego un modelo que vincula los cambios en concentraciones de contaminantes con los cambios en la incidencia de efectos nocivos sobre la salud de la población. Este último se basa en las llamadas funciones *dosis - respuesta* o *exposición-respuesta* (E-R). Finalmente, se valoriza el cambio en la incidencia de los efectos usando valores sociales. La función de daño se resume en el esquema presentado en la siguiente figura.

Figura 2-1 Esquema del Método de la Función de Daño.



Fuente: DICTUC (2010)

En la cuantificación de beneficios, se desarrollan entonces los siguientes pasos:

- Identificación de impactos
- Cuantificación de impactos
- Valoración de impactos

2.2.1 Identificación de Impactos

La literatura especializada en el análisis de los efectos adversos de la contaminación identifica un conjunto de impactos que pueden ser atribuidos a la contaminación atmosférica por $MP_{2.5}$. A partir de estos, se describen a continuación en términos generales, los costos evitados que potencialmente puede producir la aplicación de la norma de $MP_{2.5}$. Adicionalmente se señala cuales de estos costos evitados se incluirán en la parte cuantitativa de la evaluación.

Tabla 2-3 Beneficios identificados y valorados como Costos Evitados.

Tipo	Receptor Impactado	Descripción	Observaciones
Salud	Población	Mortalidad y morbilidad evitadas.	Beneficio incluido para las ciudades del país analizadas
Visibilidad	Paisaje	Aumento en la visibilidad, lo que conlleva beneficios estéticos asociados a un aumento del valor escénico de los entornos naturales y artificiales del país.	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 SO ₂ , precursor de MP _{2,5}	No evaluado en términos cuantitativos
Biodiversidad	Flora y Fauna	Protección de la biodiversidad	No evaluado en términos cuantitativos
	Ecosistemas	Protección de ecosistemas por disminución de deposición seca y/o húmeda.	No evaluado en términos cuantitativos
	Suelo y Cuerpos de Agua	Protección de los suelos y aguas superficiales de efectos como la acidificación.	No evaluado en términos cuantitativos

Fuente: (DICTUC 2009)

Para efectos de evaluación, sólo se considerarán costos evitados en salud, salvo para el caso de la ciudad de Santiago, donde se incorporarán además beneficios en visibilidad y materiales. El motivo de esta decisión radica en que no se dispone de la información necesaria para realizar la evaluación de los otros beneficios identificados en otras ciudades del país. Para el caso de la ciudad de Santiago, se dispone de antecedentes para conducir la evaluación de los dos últimos aspectos, los que provienen de estudios realizados en el marco del Plan de Prevención y Descontaminación de dicha ciudad y la evaluación ambiental del Transantiago ambos realizados por DICTUC S.A.. Con esta decisión, los

Relación de la norma de calidad primaria MP 2,5 con la norma de calidad primaria de MP 10

beneficios quedarán subestimados en términos generales. De manera específica, los impactos en salud evaluados son los que se registran en la Tabla 7.

2.2.2 Cuantificación de Impactos

Una vez identificados los efectos a cuantificar, se debe estimar el impacto que produce los cambios en las concentraciones ambientales. La mayoría de las funciones C-R son del tipo de "riesgo relativo". Para estas funciones, que corresponden generalmente a relaciones de tipo log-lineal, el cambio en la incidencia de los efectos está dado por la siguiente ecuación:

$$\Delta E_{ij}^k = [\exp(\beta_{ij}^k \cdot \Delta C^k) - 1] Pop_j^k IR_{ij} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

ΔE_{ij}^k : es el cambio en el número de efectos i debido al cambio de concentraciones del contaminante k en la población i .

β_{ij}^k : es el coeficiente de riesgo unitario del efecto i en la subpoblación j producto del contaminante k .

ΔC^k : es el cambio de concentración del contaminante k .

Pop_j^k : es el número de personas del grupo j que está expuesta al contaminante k .

IR_{ij} : es la tasa incidencia del efecto i en la población j .

La población i corresponde generalmente a una división de la población según grupo etario. Generalmente los más usados son infantes (0-1 años), niños (0-17 años), adultos (18-64 años) y adultos mayores (mayores de 65 años), aunque en algunos estudios se usan grupos de edad definidos específicamente (por ejemplo, Pope *et al*, estudian el efecto en todas las personas mayores de 30 años de edad). En algunos casos no se distingue por grupo de edad, realizándose la

estimación para la población completa. El cálculo de los efectos se debe realizar en concordancia con el grupo etario usado en el estudio original.

El término $Pop_j^k IR_{ij}$ representa sencillamente el número de casos del efecto i observado en la situación actual, es decir, sin que se produzca el cambio en las concentraciones del contaminante. Este número de casos se expresa en función de la tasa de incidencia IR_{ij} y la población expuesta Pop_j^k debido a que generalmente el número de casos no está disponible directamente, pero se puede calcular fácilmente a partir de datos locales de población expuesta y de tasas de incidencia promedio del país o de la región bajo análisis.

2.2.2.1 Reducciones Requeridas

La estimación de las reducciones requeridas en los niveles de emisión, se elaboró considerando dos casos:

- a) Las reducciones de las concentraciones de MP suponiendo el cumplimiento de la Norma MP10 vigente (la cual reduce en el 2012 la norma diaria de 150ug/m³ a 120 ug/m³) y
- b) Las reducciones de las concentraciones considerando la acción en conjunto de las dos normas, la Norma de MP10 junto con la norma para MP 2,5.

Para cada uno de los casos se analizan las situaciones en que las normas, anuales y diarias se encuentran activas, estimando para cada una de las

Relación de la norma de calidad primaria MP 2,5 con la norma de calidad primaria de MP 10

ciudades, las situaciones en que la norma diaria es más estricta que la norma anual y viceversa¹².

De acuerdo a lo presentado en la sección destinada a la elaboración de la línea base, las reducciones de concentración se contrastan contra la norma implícita de MP_{2,5} que se desprende de la vigencia de la norma de MP₁₀, la que constituye la situación base¹³. Estas reducciones de concentración se presentan en el siguiente cuadro.

¹² Para mayores detalles respecto de la metodología empleada para estimar las reducciones de las concentraciones ver Anexo 5.1.

¹³ Recordamos que el MP₁₀, contiene la fracción fina (ó MP_{2,5}), por lo tanto, al controlar MP₁₀, se controla de manera implícita el MP_{2,5}.

Tabla 2-4 Reducciones Requeridas por Ciudad de MP2,5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Ciudades	Población	Año 2012	Año 2022	Año 2032
Arica	190.956	-	-	-
Alto Hospicio	51.757	0,1	0,1	8,2
Pozo Almonte	11.162	-	-	-
Iquique	171.306	1,0	1,0	1,3
Antofagasta	306.020	-	-	-
Calama	142.651	-	-	4,5
Mejillones	8.676	-	-	-
Sierra Gorda	2.428	1,2	2,4	12,4
Tocopilla	24.722	-	-	-
Caldera	14.156	-	-	-
Chañaral	13.959	-	-	-
Copiapó	133.054	1,9	4,2	14,2
Huasco	8.189	-	-	1,5
La Serena-Coquimbo	666.211	-	-	1,5
Ovalle	101.100	0,8	3,5	13,5
La Calera	51.023	-	-	0,7
Cabildo	19.497	-	-	7,5
Quintero	21.824	-	-	9,4
Gran Valparaíso	844.541	-	-	7,9
Putucundo	15.099	-	-	8,8
Llallay	22.308	-	-	6,3
Puchuncaví	13.352	-	2,4	12,4
Quilota	78.247	-	1,9	11,9
Catemu	12.484	-	-	4,1
Los Andes	62.046	-	-	9,0
San Antonio	114.921	-	-	9,0
San Felipe	66.095	16,1	16,1	21,7
Gran Santiago	6.247.257	9,2	12,4	22,4
Rancagua	104.068	3,0	7,6	17,6
Requinos	22.841	6,4	11,4	21,4
Rengo	52.390	2,6	6,3	16,3
San Fernando	65.689	-	2,7	12,7
San Vicente	41.489	-	-	9,0
Cauquenes	42.482	-	-	2,5
Constitución	47.496	6,8	6,8	15,0
Curicó	123.256	6,8	6,8	15,0
Linares	85.805	7,1	12,2	22,2
Talca	207.992	4,6	7,1	17,1
Chillán	189.687	-	4,9	14,9
Gran Concepción	897.977	-	1,2	11,2
Artauco	35.944	4,9	9,9	19,9
Codegua	11.127	1,6	6,6	16,6
Los Ángeles	171.669	1,6	6,6	16,6
San Carlos	51.626	1,6	6,6	16,6
Angol	50.900	1,6	6,6	16,6
Nueva Imperial	41.289	9,2	14,2	24,2
Gran Temuco	313.479	7,8	12,8	22,8
Osorno	149.941	1,6	6,6	16,6
Puerto Montt	181.339	1,6	6,6	16,6
Valkivia	144.874	10,0	15,0	25,0
Coihaique	51.577	-	-	2,5
Punta Arenas	123.164	-	-	-
Total	12.622.758			

Fuente: (DICTUC 2009)

2.2.2.2 *Funciones Exposición - Respuesta*

Los casos evitados de una mejora de en la calidad del aire se calculan a través de la aplicación de funciones exposición-respuesta (E-R), las que proveen una relación del cambio relativo en la incidencia de estos efectos en salud ante cambios en los niveles de concentración ambiental de los contaminantes en estudio.

Estas relaciones se obtienen a través de la realización de estudios epidemiológicos que buscan encontrar asociaciones estadísticamente significativas, entre la ocurrencia de estos impactos en salud y la exposición a distintos niveles de concentración de MP_{2,5}, corrigiendo por la presencia de otros factores que pueden provocar el mismo efecto. De esta manera se obtiene un porcentaje que representa el riesgo de padecer el efecto en salud analizado producto de los niveles de contaminación existentes.

De manera genérica, estos efectos en salud pueden ser clasificados en las siguientes categorías: mortalidad prematura; acciones médicas, como hospitalizaciones; dolencia o enfermedad; y restricciones de actividad, incluido días laborales perdidos.

Las funciones concentración-respuesta son el centro del análisis, por lo tanto su selección es crítica. La siguiente tabla muestra el resumen de los coeficientes de las funciones E-R que se usan en el cálculo de los efectos asociados al material particulado.

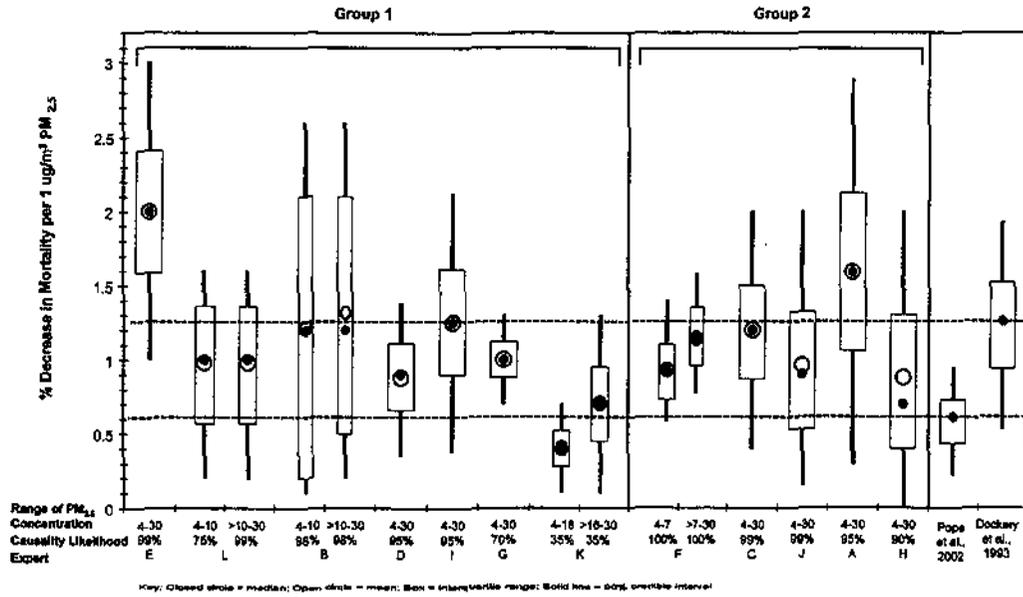
Tabla 2-5 Resumen de Coeficientes de Funciones E-R para Material Particulado.

Efecto	Cama	Grupo Edad	Contaminante	Exposición	Inc. por 10 μ g/m ³ (IC)			Fuente
Mortalidad Prematura	Todas	Todos	MP2.5	Aguda	1,2%	(0,6%	- 1,8%)	Cifuentes et al. 2000
				Crónica	6,2%	(1,5%	- 10,9%)	Pope et al 2002
	Cardiopulmonar	Adultos > 30 años	MP2.5	Crónica	9,3%	(3,6%	- 15,0%)	Pope et al 2004
Admisiones Hospitalarias	Asma	Adultos	MP25	Aguda	3,3%	(1,3%	- 5,4%)	Dockery et al., 1989
		Niños	MP25	Aguda	3,3%	(1,3%	- 5,4%)	Dockery et al., 1989
	Cardiovascular	Adultos	MP25	Aguda	1,4%	(0,7%	- 2,1%)	Schwartz 1997
		Adultos Mayores	MP25	Aguda	1,6%	(0,9%	- 2,2%)	Schwartz & Morris, 1995
	Disritmia	Adultos Mayores	MP25	Aguda	1,3%	(2,7%	- 5,2%)	Pooled
	Enf Respiratoria Crónica	Adultos	MP25	Aguda	2,2%	(0,8%	- 3,6%)	Schwartz & Morris, 1995
	Neumonía	Adultos Mayores	MP25	Aguda	4,0%	(0,7%	- 7,2%)	Metanalysis
	Respiratorias	Adultos Mayores	MP10	Aguda	3,1%	(1,5%	- 4,7%)	Pooled
	Enf. Resp. Crónica	Adultos Mayores	MP25	Aguda	1,9%	(0,8%	- 2,9%)	Whittemore and Karu, 1980
	Enf. cardio congestiva	Adultos Mayores	MP25	Aguda	3,1%	(0,5%	- 5,6%)	Metanalysis
	Enf. cardio isquémica	Adultos Mayores	MP25	Aguda	1,4%	(0,8%	- 3,7%)	Pooled
Visitas Médicas	IRA baja	Niños	MP10	Aguda	1,5%	(0,3%	- 2,7%)	Ostro et al, 1999
Restricción de Actividad	Días Laborales Perdidos	Adultos	MP2.5	Aguda	4,6%	(4,0%	- 5,3%)	Ostro et al, 1987
	Días con Act. Restringida	Adultos	MP2.5	Aguda	4,8%	(4,2%	- 5,3%)	Ostro et al, 1987
	Días con Act. Rest. Level	Adultos	MP2.5	Aguda	7,4%	(6,0%	- 8,8%)	Ostro et al, 1989

Fuente: Actualización DICTUC (2010) a (DICTUC 2009)

Sin duda el efecto más importante es la mortalidad, efecto para el cual existe la mayor cantidad de estudios. La USEPA, encargó recientemente un estudio en que se consulto a 16 expertos por su opinión experta acerca del impacto de una reducción permanente en las concentraciones anuales de MP2,5. Las estimaciones de los expertos se muestran en la siguiente figura. También se muestran los resultados del estudio de (Pope, Burnett et al. 2002)Pope 2002, considerado una cota inferior, y el de (Dockery, Pope III et al. 1993) Dockery 1993 (estudio de las seis ciudades), considerado una cota superior.

Relación de la norma de calidad primaria MP 2,5 con la norma de calidad primaria de MP 10



2.2.2.3 Tasas de incidencia

Para la estimación de los casos evitados se requiere además la tasa de incidencia base para cada uno de los eventos de enfermedad considerados. Conocida la tasa de incidencia de los efectos en salud identificados, se procede a estimar la cantidad de casos en exceso producidos por la contaminación aplicando los porcentajes de riesgo establecidos, o E-R, sobre éstas. A continuación se presentan las tasas de incidencia consideradas para esta evaluación:

Relación de la norma de calidad primaria MP 2,5 con la norma de calidad primaria de MP 10

Tabla 2-6 Resumen de Coeficientes de Funciones C-R para Material Particulado.

Efecto	Causa	Grupo Edad	Contaminante	Exposición	Tasa de Incidencia (Casos*1e5/Población)
Mortalidad Prematura	Todas	Todos	MP2,5	Aguda	505
				Crónica	505
	Cardiopulmonar	Todos	MP2,5	Crónica	220
Admisiones Hospitalarias	Asma	Adultos Mayores	MP25	Aguda	60
		Niños	MP25	Aguda	40
		Adultos	MP25	Aguda	545
	Cardiovascular	Adultos Mayores	MP25	Aguda	4580
		Adultos Mayores	MP25	Aguda	390
	Enf Respiratoria Crónica	Adultos	MP25	Aguda	65
		Adultos Mayores	MP25	Aguda	880
	Neumonía	Adultos Mayores	MP25	Aguda	1915
	Respiratorias	Adultos Mayores	MP10	Aguda	3550
	Enf. cardio congestiva	Adultos Mayores	MP25	Aguda	640
	Enf. cardio isquémica	Adultos Mayores	MP25	Aguda	305
Visitas Médicas	IRA baja	Niños	MP10	Aguda	41750
Restricción de Actividad	Días Laborales Perdidos	Adultos	MP2,5	Aguda	400000
	Días con Act. Restringida	Adultos	MP2,5	Aguda	646000
	Días con Act. Rest. Level	Adultos	MP2,5	Aguda	780000

Fuente: Actualización DICTUC (2010) a (DICTUC 2009)

2.2.3 Valoración de Impactos

El valor monetario de los beneficios en salud pueden ser estimados a través de dos formas: mediante el valor monetario de los gastos involucrados en la restauración de la condición de salud más la pérdida de días laborales, denominada enfoque de costo de enfermedad, y mediante la estimación de lo un individuo estaría dispuesto a ceder para obtener la mejora respectiva en la salud o enfoque de disposición a pagar.

El enfoque de disposición a pagar es el más adecuado para aproximarse a los efectos sobre el bienestar que produce la mejora en la calidad del aire, desafortunadamente dichos valores no están generalmente disponibles, por lo que valores de costo de enfermedad son utilizados. Alternativamente se han utilizado transferencia de valores de disposición a pagar y costo de enfermedad en determinados casos, adoptando las precauciones necesarias para dar cuenta de las diferencias de contexto e ingreso existentes.

Uno de los principales efectos de la contaminación atmosférica es el aumento de la mortalidad. En este caso se expresa como los casos de muertes en exceso en la población expuesta. Debido a que toda la población expuesta está sujeta al riesgo, el beneficio de reducir la contaminación corresponde realmente a la reducción de pequeños riesgos de muerte en toda la población. Por simplicidad, en la literatura se usa el concepto de "Valor de una Vida Estadística" (VVE), que no es más que la suma de las disposiciones a pagar de la población expuesta por reducciones de riesgo pequeñas¹⁴ tales que sumadas son igual a 1. Es

¹⁴ La disminución media del riesgo anual de muerte debido a una baja permanente de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de $\text{PM}_{2.5}$ en Santiago está dado aproximadamente por $0.0062 \cdot 10 \cdot 483/100.000$, es decir 290 en 1 millón.

Relación de la norma de calidad primaria MP 2,5 con la norma de calidad primaria de MP 10

necesario recalcar que este concepto no implica la valoración de la vida humana, sino que la valoración de riesgos pequeños de muerte¹⁵.

Siendo éste uno de los efectos más importantes, lo ideal sería usar valores obtenidos localmente. De acuerdo a lo recabado en este estudio, existe, en toda Latinoamérica, un sólo estudio que valora las reducciones de riesgo de muerte. Este estudio fue realizado por Cifuentes et al (2000) como parte de un proyecto Fondecyt¹⁶. Los resultados de este estudio dependen de la magnitud de la reducción de riesgo valorada. La siguiente tabla muestra el VVE obtenida para dos magnitudes de reducción de riesgo en los próximos 10 años: 5 en 1000 y 1 en 1000, además de una reducción de 5 en 1000 en el futuro, cuando el sujeto tenga 70 años de edad. Los valores originales (en pesos de 1998) han sido transformados a UF usando el valor promedio de la UF en 1998 (14.354,38 \$/UF).

Tabla 2-7 Estimaciones del VVE en Santiago por medio del método de valoración contingente (UF por vida estadística)

Caso	Media	p5	p95
5 in 1000	13.634	(12.125	- 15.644)
1 in 1000	37.569	(32.567	- 42.497)
Riesgo futuro	6.988	(3.687	- 12.359)

Fuente: Cifuentes, Prieto y Escobari (2000), actualizados al 2008 usando la variación de ingreso medio en Santiago entre 1997 y 2007.

Este es el valor base del VVE. Aun cuando está expresado en UF, este valor puede aumentar en el tiempo, ya que depende del ingreso per cápita. Si el ingreso aumenta, también aumentara la disposición al pago por reducciones de

¹⁵ Para una discusión de las implicancias éticas de ambos conceptos, ver Cropper, M. L. y A. M. Freeman III (1991), 'Environmental Health Effects' en J. B. Braden y C. D. Kolstad (eds.), *Measuring the Demand for Environmental Quality*, Amsterdam, North Holland: 165-211.

¹⁷Cifuentes, L., J. J. Prieto y J. Escobari (2000), 'Valuation of mortality risk reductions at present and at an advanced age: Preliminary results from a contingent valuation study', Tenth Annual Conference of the European Association of Environmental and Resource Economists, Crete, Greece.

riesgo de muerte. Para actualizar este valor se puede usar el ingreso per cápita (reportado por el Banco Mundial, por ejemplo), pero dado que esa medida se ve afectada por la variación en el tipo de cambio, se prefirió usar el aumento de ingreso medio reportado por la encuesta CASEN, que no está afecto a esa variación. Según la encuesta CASEN de 2008, el ingreso promedio mensual de los santiaguinos pasó de \$ 173.527 en 1997 a \$ 261.960 en el ejercicio pasado - ambos medidos en pesos de 2007. Esto significa un aumento real de 51% para el periodo 1997 a 2007. Aun cuando este periodo no corresponde exactamente al periodo que queremos (1998 a 2008), creemos que el error de usar este incremento es pequeño.

Debido a que se usan funciones concentración-respuesta basadas en la exposición crónica al material particulado, el valor de riesgos futuros parecería apropiado. Pero el rezago entre la exposición y el aumento de riesgo no es claro que sea tan largo. Debido a esto, es pertinente usar dos escenarios para la valoración: un escenario bajo, basado en los riesgos futuros, y un escenario alto, basado en los riesgos presentes. Para este último escenario se usa el promedio de la estimación de 1 en 1000 y 5 en 1000. De esta manera, el valor de una vida estadística recomendado para usar en el análisis de beneficios es el siguiente. Para el escenario bajo, se recomienda UF 10.500 (5.560- 18.700) por vida estadística (mejor estimador, intervalo de confianza del 95%, todos los valores con 3 cifras significativas). Para el escenario alto, se recomienda UF 38.700 (33.700- 43.900) por vida estadística.

Cabe destacar que según lo reportado en numerosos estudios en el área, los beneficios por mortalidad representan aproximadamente un 90% del total de los beneficios económicos de la reducción del material particulado fino.

2.3 Cuantificación de Costos

La estimación de costo se realizó a nivel de las fuentes detalladas en inventarios de emisiones en 8 localidades de Chile (Calama, Tocopilla, V Región, Ventanas, VI Región, Gran Concepción, Gran Temuco y Gran Santiago). Se utilizaron como insumos para estas estimaciones, las medidas para reducción de emisiones evaluadas en los AGIES de los planes de descontaminación de la Región Metropolitana, Temuco, Tocopilla y Calama. De éstos, se consideran 17 medidas para fuentes móviles, 10 medidas para fuentes fijas y 2 medidas para fuentes fugitivas. Adicionalmente, se utilizó el *Air Control Net Documentation Report* (2006) (costo-efectividad para MP₁₀, MP_{2,5}, NO_x, NH₃, SO_x) desarrollado por US-EPA, para el análisis de regulación en calidad del aire, considerando medidas adicionales para fuentes fijas, aplicables a la realidad chilena¹⁷. En las ciudades sin inventarios de emisiones disponibles, se realizó una asignación directa de curvas de costos a partir de otras ciudades o zonas con características similares¹⁸, tales como geográficas, demográficas, climáticas, etc.

2.3.1 Relación Emisión Concentración

Para estimar la reducción de emisiones requeridas para obtener un cambio en la concentración de MP_{2,5} se utilizaron factores de emisión concentración (FEC)¹⁹.

Para el cálculo de FEC se requiere conocer la relación que existe entre las emisiones de un contaminante y la concentración que esta genera en el

¹⁷ 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. Para ver la lista de medidas empleadas revisar Anexo 5.4

¹⁸ Para ver el detalle de las ciudades a las que fueron asignadas curva de costos, ver Anexo 5.5.

¹⁹ Los Factores de Emisión de Concentración se presentan en la Tabla 5 de la sección 2.1.1.2.

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:

$$FEC_i^t = \left(\frac{\partial C_i^t}{\partial E_i^t} \right)^{-1} \approx \frac{E_i^t}{C_i^t} \quad \text{Ecuación 1}$$

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 .

Relación de la norma de calidad primaria MP 2,5 con la norma de calidad primaria de MP 10

En el cálculo de la formación del material particulado secundario, las emisiones de los diferentes precursores se relacionaron con la fracción correspondiente del material particulado secundario, obtenido a partir de información contenida en estudios de los filtros de los monitores, en distintas estaciones²⁰.

Para realizar la proyección de concentraciones ambientales se estima primero un cambio en las emisiones. Con ello, y en base a los Factores de Emisión-Concentración (FEC) del modelo *rollback*, se proyecta la evolución de las concentraciones. Los FEC utilizados pueden verificarse a continuación.

Tabla 2-8 Factores Emisión-Concentración (FEC) para MP_{2,5} utilizados en el presente estudio ((ton/año)/(μg/m³)).

Ciudad	MP _{2,5}	SOx	NOx	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	-	-	10.100

Fuente: (DICTUC 2009)

2.3.2 Curvas de Costo

Para estimar los costos sociales de alcanzar la nueva norma finalmente se construyeron las curvas de costo: Costo total por μg/m³ de MP_{2,5} reducido. Esta curva entrega el mínimo costo total para cada nivel de reducción. Para cada una de las fuentes y medidas posibles, se calculó su costo medio CMe (US\$/μg/m³ de MP_{2,5} reducido), los cuales fueron ordenados de manera

²⁰ Para mayor detalle de la metodología empleada en este cálculo, ver Anexo 5.3

creciente con el fin de determinar las mejores medidas en cuanto a costo-efectividad.

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 la medida óptima en cuanto a eficiencia-costo.

Luego de obtenidas las curvas de costo para las distintas ciudades, estas se ajustaron a un polinomio cúbico.²¹ La tabla a continuación muestra los resultados del ajuste de curvas cúbicas para cada una de las ciudades.

Tabla 2-9 Resultados Ajuste Cúbico a Curvas de Costo.

Ciudad	Coefficiente	Desviación estándar	T-Test	R2 ajustado	N
Calama	55.841	5.025	11	0.56	92
Tocopilla	2.176	4.160	18	0.85	9
V Región	553.663	10.971	50	0.93	23
Ventanas	249	24	10	0.66	52
VI Región	530.361	36.752	14	0.86	23
Gran Concepción	55.518	2.103	26	0.86	101
Gran Temuco	5.650	3	10	0.71	5
Gran Santiago	85.694	524	164	0.99	229

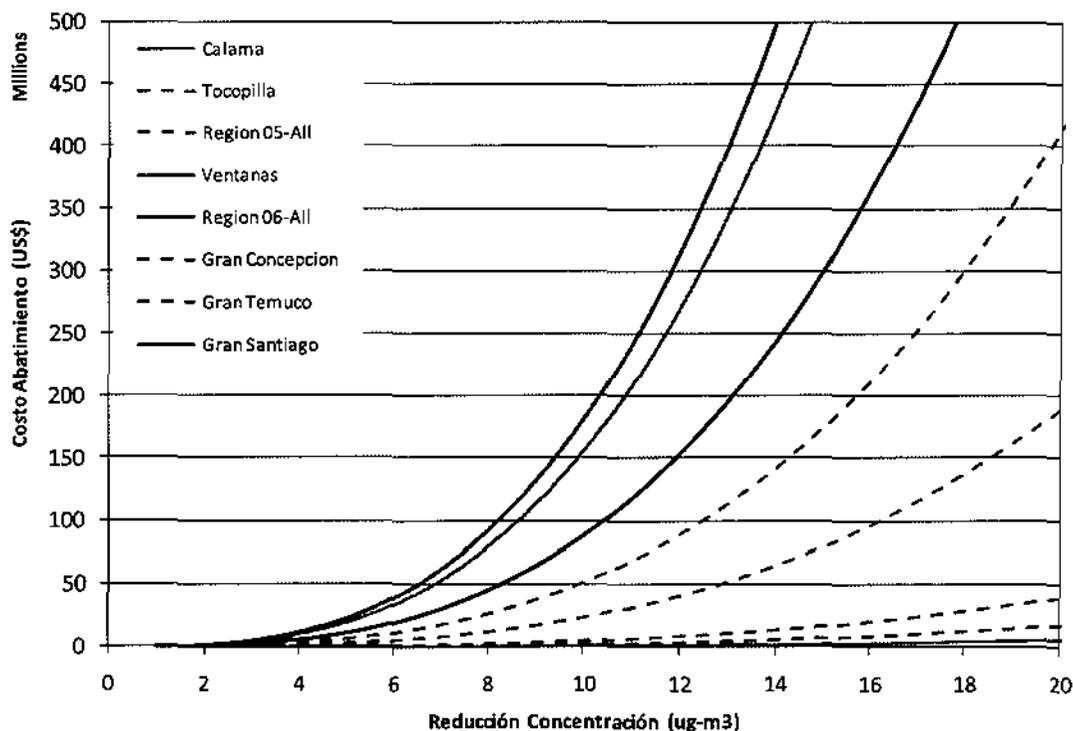
*Ecuación: Costo Total= β *(Reducción Concentración)³

Fuente: (DICTUC 2009)

²¹ El ajuste se realiza mediante la siguiente expresión: $CT = a \cdot red^3$, donde CT es el Costo Total de Abatimiento (US\$); a es el Coeficiente de ajuste polinomio cúbico y red será la reducción de $MP_{2.5}$ ($\mu g/m^3$).

Relación de la norma de calidad primaria MP 2,5 con la norma de calidad primaria de MP 10

Figura 2-2 Curva de Costos Totales de reducción de MP2,5 para ciudades analizadas, año 2012.



Fuente: (DICTUC 2009)

Destaca en el gráfico de la figura 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 $\text{MP}_{2,5}$ reducido es bajo, con lo cual mediante una inversión menor relativamente a otras localidades puede reducirse bastante la concentración de material particulado.

Medio: corresponde a Gran Concepción y Región 05-All.

Alto: asociadas a las regiones de Calama, Gran Santiago y Región 06-All. Poseen un rápido aumento de pendiente (*CMe*) lo que hace costoso reducir partículas finas. Por ejemplo, para el caso de la VI región, el más

Relación de la norma de calidad primaria MP 2,5 con la norma de calidad primaria de MP 10

alto, reducir 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ se incurre en aproximadamente entre US\$ 150 y US\$ 200 millones anuales en costos sociales.

2.3.3 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 $\text{MP}_{2,5}$ mejora 1% anual.

Este supuesto afecta positivamente en el cálculo de los beneficios netos, considerando que las medidas ya implementadas serán más baratas y con una mejor eficiencia en la remoción de contaminantes en el futuro.

2.3.4 Costos de Monitoreo

Se consideró en el análisis, el costo adicionales requeridos en Chile para el monitoreo de material particulado, de acuerdo a lo normado por la Directiva de la Unión Europea (2008). En total se requieren 22 nuevos monitores, donde 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.

2.3.5 Costos de declaración zona saturada

En el análisis se incluyó el costo asociado a la declaración de zona saturada, que implica la implementación de la norma de MP_{2,5} analizada. De acuerdo con información aportada por la contraparte el costo de declaración de zona saturada incluyendo los estudios requeridos (modelación atmosférica, inventarios de emisiones, 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 evaluados.

Tabla 2-10 Número de Ciudades Declaradas como Zona Saturada por Alternativa Evaluada y Valor Presente de los Costos para Zona Saturada.

Escenario	2012	2022	2032	VP Costos (MM USD)	VP Costos Min (MM USD)	VP Costos Max (MM USD)
Base	15	0	0	4,6	3,6	5,7
Norma Prop. MP _{2,5}	15	5	7	5,8	4,5	7,2

*Solo para ciudades con información de monitoreo

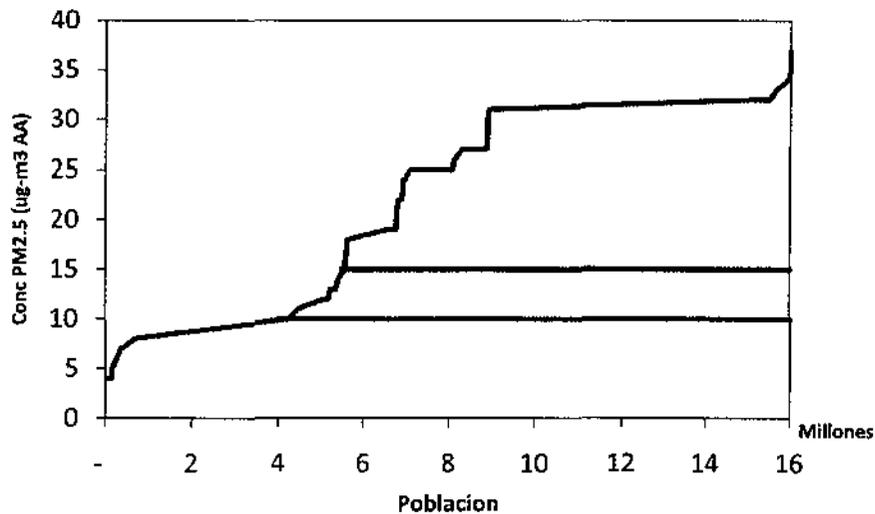
VP descontado al 6%

Fuente: (DICTUC 2009)

3 RESULTADOS

La evaluación económica de la norma se realiza para un período de 30 años, 2012-2041. Más de 10 millones de habitantes están expuestos a concentraciones mayores a 15 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de $\text{MP}_{2,5}$ 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 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), la situación se torna aún más crítica, como se puede apreciar en la figura a continuación.

Figura 3-1 Exposición de la Población Chilena a $\text{MP}_{2,5}$



Fuente: Actualización DICTUC (2010) a (DICTUC 2009).

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 para la propuesta de norma considerando el período comprendido entre 2012-2041.

Relación de la norma de calidad primaria MP 2,5 con la norma de calidad primaria de MP 10

Tabla 3-1 Casos Totales Evitados en el Período 2012-2041 (Miles de casos) y Costos en (MMUSD)

Efecto	Norma Base MP ₁₀	Norma Propuesta MP _{2,5}
Mortalidad Prematura	102	148
Admisiones Hospitalarias	62	92
Visitas Sal Emergencia Niños	97	151
Días Laborales Perdidos	690	980
Días con alguna restricción de actividad	42.000	59.000
Costos (Millones de USD)	11.500	22.200

Nota: Los casos para la Norma Base MP₁₀ se calculan con respecto a la situación proyectada.

Valores presentados con tres cifras significativas.

Fuente: (DICTUC 2009)

Adicionalmente a los casos evitados, la implementación de la norma implicarían un aumento en la esperanza de vida de toda la población como consecuencia de la reducción de de concentraciones de MP_{2,5}. Se estima que aumentará la esperanza de vida en aproximadamente 10, 11 y 12 meses, para los años 2012, 2022 y 2032 respectivamente.

Tabla 3-2 Aumento de esperanza de vida para toda la población según norma (meses)

Escenario	2012	2022	2032
Norma Base MP ₁₀	6,3	6,3	6,3
Norma Propuesta MP _{2,5}	10,3	11,5	12,3

Fuente: (DICTUC 2009)

Se estimaron los costos y beneficios para la Norma propuesta. En la Tabla 3-3 es posible apreciar el percentil 50²² del valor presente de beneficios y costos, segmentados por períodos de 10 años y para todo el período de evaluación analizado.

²² 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.

Relación de la norma de calidad primaria MP 2,5 con la norma de calidad primaria de MP 10

Tabla 3-3 Valor presente de los costos y beneficios por período (percentil 50, Millones de US\$)

Escenario	Item	2012-2021	2022-2031	2032-2041	VP 2012-2041
Norma Base MP ₁₀	VP Beneficios	22.600	18.600	15.400	56.500
	VP Costos	7.380	3.420	1.600	12.300
Norma Prop. MP _{2,5}	VP Beneficios	23.600	22.200	30.600	76.400
	VP Costos	6.100	4.810	12.900	23.700

Nota: Valor Presente calculado para los distintos períodos, con una tasa de descuento de 6% anual. Tipo Cambio 517 CLP/USD. Valores presentados con tres cifras significativas.

Fuente: Actualización DICTUC (2010) a (DICTUC 2009)

El VP de los beneficios obtenidos es mayor al VP de los costos y ascienden a US\$ 76.400 millones, considerando el percentil 50 de los resultados obtenidos. El VP de los costos de implementación de la norma se calcula en 23.700 millones de USD durante los 30 años en los que se evalúa el proyecto.

Los resultados 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 las alternativas evaluadas.

Tabla 3-4 Costo de Reducción Anual por Período de Tiempo (Millones de USD por año)

Escenario	Período		
	2012-2021	2022-2031	2032-2041
Base	960	430	210
Norma Propuesta MP _{2,5}	860	640	1.700

Fuente: Actualización DICTUC (2010) a (DICTUC 2009)

Nota: Tipo Cambio 517 CLP/USD. Valores presentados con dos cifras significativas.

Tabla 3-5 VP Beneficio Neto de la Norma Propuesta para MP 2,5. (Millones de US\$)

Escenario	Percentil 50%	IC del 90%
Base	44.200	(2.630 - 86.000)
Norma Propuesta MP _{2,5}	52.700	(8.140 - 112.000)

Fuente: Actualización DICTUC (2010) a (DICTUC 2009)

Nota: Valor Presente calculado con una tasa de descuento de 6% anual. Tipo Cambio 517 CLP/USD. Valores presentados con tres cifras significativas.

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 siguiente tabla, presenta un resumen el valor presente de beneficios y costos totales detallado por agente económico.

Tabla 3-6 VP de los Beneficios y Costos distribuidos por Agente Económico. (Millones de US\$)

Ítem	Base	Norma Propuesta MP _{2,5}
Beneficios		
Privados	2.260	3.050
Estado	6.780	9.160
Población	47.400	64.100
Total	56.500	76.400
Costos		
Privados	3.170	9.520
Estado	2.580	6.750
Población	6.560	7.490
Total	12.300	23.700

Fuente: Actualización DICTUC (2010) a (DICTUC 2009)

Nota: Valor Presente calculado con una tasa de descuento de 6% anual. Tipo Cambio 517 CLP/USD. Valores presentados con tres cifras significativas.

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.

Los costos de la normativa se distribuirían entre los distintos sectores regulados. Dependiendo de la reducción requerida por la norma en una ciudad en particular y de acuerdo con las medidas de abatimiento requeridas para

Relación de la norma de calidad primaria MP 2,5 con la norma de calidad primaria de MP 10

cumplir con esta reducción al mínimo costo (ver DICTUC (2009)), se determina la distribución del costo total de reducción entre las fuentes emisoras controladas. Los resultados obtenidos se detallan a continuación.

Tabla 3-7 Distribución de Costos por Sector y Tipo de Fuente.

Sector	Fuentes fugitivas	Fuentes móviles	Industrial	Otros	Residencial	Comercial
Base	8%	12%	19%	13%	48%	0%
Norma Prop. MP _{2,5}	14%	12%	34%	14%	26%	0%

Fuente: Actualización DICTUC (2010) a (DICTUC 2009)

En base a esta distribución se estima los costos por sector emisor. A continuación se presentan los costos totales estimados.

Tabla 3-8 Valor Presente de Costos Distribuidos por Sector Emisor (Millones de US\$).

Sector	Base	Norma Prop. MP _{2,5}
Fuente fugitivas	947	3.390
Fuentes móviles	1.490	2.920
Industrial	2.380	7.970
Otros	1.620	3.350
Residencial	5.860	6.120
Comercial	0	2
Saturadas	5	6
Monitoreo	4	4
Total	12.300	23.700

Nota: Valor Presente calculado con una tasa de descuento de 6% anual. Tipo Cambio 517 CLP/USD. Valores con tres cifras significativas

Fuente: Actualización DICTUC (2010) a (DICTUC 2009)

4 ANÁLISIS DE LOS NIVELES DE EPISODIOS CRÍTICOS

4.1 *Introducción*

Este capítulo presenta el análisis de los costos y beneficios de la implementación de los niveles críticos para la norma diaria de MP_{2,5}. Estos niveles críticos fueron presentados en la Tabla 1-2. Se analiza tanto el nivel de la norma de 24hr como los niveles de las situaciones de excepción.

4.1.1 **Relación entre norma diaria y norma anual**

La norma diaria y la norma anual están obviamente relacionadas. La norma diaria controla el percentil 98 de las concentraciones promedio diarias de 24 horas (al que llamaremos C_{98}) mientras que la norma anual controla el promedio trianual (que se obtiene a partir de las concentraciones promedio de 24 horas). Las concentraciones promedio de 24 horas siguen en general una distribución de frecuencia que puede ser aproximada, sin mucho error, a una distribución lognormal. La forma de esta distribución depende de la relación entre la media y la desviación estándar (o la mediana, y la desviación estándar geométrica). Una manera aproximada de modelar la relación es usando directamente el cociente entre el percentil 98 y la media anual, que llamamos alfa. Si el valor de alfa es alto (es decir, existe una alta estacionalidad de las concentraciones de 24 hrs durante el año), la norma diaria podría obligar a una reducción de los niveles de concentraciones durante todo el año. Sin embargo, esto se puede evitar con la adopción de medidas estacionales, que disminuyen los niveles altos de concentraciones diarias en los meses críticos. En este análisis se asume que se adoptan estas medidas, por lo que no será necesario disminuir la concentración promedio anual. Entonces, el impacto de la norma diaria se traduce solo en las medidas de gestión de episodios críticos, que son gatillados

cuando las concentraciones de 24h superan los niveles críticos de situaciones de emergencia.

4.1.2 Medidas de Gestión de Episodios Críticos

De acuerdo a la regulación vigente publicada a través del D.S. 58/2004 (SEGPRES 2004), cuando se decretan episodios críticos de contaminación atmosféricas de MP₁₀ se activan medidas restrictivas para diferentes tipo de actividades. La Tabla 4-1 presenta las medidas que actualmente se aplican en episodios críticos en la Región Metropolitana, la cual es la única que posee un plan durante este tipo de periodos. Se ha asumido que para la GEC de MP_{2,5} se aplicarán las mismas medidas.

Tabla 4-1 Medidas de control aplicadas según episodio crítico de calidad del aire en la RM

Episodio	Medidas
Alerta ambiental	<ul style="list-style-type: none"> • Restricción Vehicular 4 dígitos vehículos SSV (lunes a viernes) y 2 dígitos (fin de semana y festivos) para VL, VM y VP • Prohibición de funcionamiento de todo tipo de estufas que utilicen leña • Aumento de la fiscalización de emisiones en un 50%
Preemergencia Ambiental	<ul style="list-style-type: none"> • Restricción Vehicular 6 dígitos (4 adicionales) vehículos SSV (lunes a viernes) y 4 dígitos (fin de semana) para VL, VM y VP • Restricción Vehicular 2 dígitos vehículos CSV (lunes a viernes) y 2 dígitos (fin de semana y festivos) para VL, VM y VP • Prohibición de funcionamiento de todo tipo de estufas que utilicen leña • Paralización industrial (523 emisores) (MP > 32 mg/m³) y fuentes que no cumplan metas de emisión de MP • Aumento del horario y número de vías segregadas y reversibles • Aumento de la fiscalización en un 100%
Emergencia Ambiental	<ul style="list-style-type: none"> • Restricción Vehicular 8 dígitos (6 adicionales) vehículos SSV (Lunes a Viernes) y 6 dígitos (fin de semana y festivos) para VL, VM y VP • Restricción Vehicular 4 dígitos vehículos CSV (lunes a viernes) y 4 dígitos (fin de semana y festivos) para VL, VM y VP • Prohibición de funcionamiento de todo tipo de estufas que utilicen leña • Paralización industrial intensiva (2038 emisores) (MP > 28 mg/m³) y fuentes que no cumplan metas de emisión de MP • Aumento del horario y número de vías exclusivas, segregadas y reversibles • Intensificación de la fiscalización en un 150%

Nota: SSV corresponde a vehículos sin sello verde, CSV corresponde a vehículos con sello verde

Fuente: (CONAMA 2010)

De las medidas presentadas en la tabla anterior sólo se consideran 3 medidas aplicables a las ciudades consideradas en el análisis (en la sección 8.9.1 se listan las dichas zonas).

Tabla 4-2 Medidas de GEC consideradas en el análisis

Medida	Driver	Variable de Ajuste para transferencia	Fuente de Información
Restricción vehicular para vehículos livianos particulares	Nº de vehículos que paralizan	Parque vehicular de cada zona (INE 2007)	Análisis RV en la RM (DICTUC 2008)
Paralización FF (Industriales, calderas de calefacción y Grupos electrogenos)	Reducción total por paralización de FF	PIB Industrial y emisiones totales de cada una de las zonas	DICTUC (2001) y Base de datos FF nacional SEREMI de Salud (2008)
Prohibición funcionamiento estufas a leña	Nº de estufas que dejan de funcionar	Parque de estufas a leña por ciudad	Análisis prohibición de estufas en RM (GAMMA Ingenieros S.A. 2007), Temuco (Villena, Villena et al. 2007), Chile (Ambiente Consultores 2007)

4.2 Método

Para estimar los costos, beneficios y reducciones de la aplicación de las medidas se calculó en primer lugar costos y beneficios unitarios de cada medida, esto es, para cada día de episodio crítico, a continuación se estimó el número de días esperado de episodios por ciudad y finalmente se calcularon los costos y beneficios esperados para cada situación.

4.2.1 Supuestos Generales

La ocurrencia de las situaciones críticas depende de dos factores:

- El nivel promedio de las concentraciones ambientales diarias.

- La estacionalidad de las concentraciones diarias.

Para este análisis se asumió que cada ciudad cumplía con los niveles promedio anuales de la norma en cada una de las etapas de implementación. Este supuesto sirve para analizar los costos y los beneficios de la gestión de episodios críticos independiente de la velocidad con que se cumpla con la norma anual (análisis que en rigor, corresponde a la evaluación de los planes de descontaminación para cada una de las ciudades). Este supuesto redundante en bajas probabilidades de superar los niveles de situaciones críticas.

4.2.2 Cálculo de los beneficios de un día de episodio crítico

Los beneficios sociales derivados de la reducción de emisiones de las medidas evaluadas se calcularon de acuerdo a la siguiente ecuación.

$$\text{Beneficio} = \text{RedConc} * \text{VSC} = \frac{\text{RedEmFCE}}{\text{FCE}} * \text{VSC}$$

Donde,

RedConc (ug/m³/día): Reducción de concentración de contaminantes debido a la medida implementada. Se refiere al promedio diario.

VSC (USD/(ug/m³)/día): Valor social de las concentraciones de contaminantes.

RedEm (ton/día): Reducción de las emisiones de contaminantes debido a la medida implementada.

FCE-EC (ton/ (ug/m³)/ día): Factor concentración - emisión asociado a episodios críticos.

El capítulo 2.2 explica en detalle las consideraciones para el valor de VSC. Para estimar el beneficio unitario diario se dividió el valor anual por 365. Los beneficios considerados corresponden a reducciones de MP_{2,5} y para su estimación no se excluyeron los efectos de largo plazo, asumiendo que la

contribución de concentraciones diarias influye en el promedio anual. La siguiente tabla muestra los valores de VSC utilizados para el 2012 según el escenario de evaluación (low y high).

Tabla 4-3 Beneficio unitario (USD/(ugPM25/m3)-dia) para algunas zonas analizadas según escenario de evaluación.

Ciudad	Beneficio Unitario	
	Esc. Low	Esc. High
Tocopilla	434	2.650
La Serena-Coquimbo	13.400	72.700
Gran Valparaíso	24.800	123.000
Gran Santiago	131.000	720.000
Gran Concepción	20.600	114.000
Gran Temuco	6.750	38.600

Fuente: Elaboración Propia

Nota: Valores con 3 cifras significativas

El capítulo 2.3.1 explica el significado de los FCE-EC mientras que en el capítulo 8.9.2 en anexos se tabulan los FCE-EC utilizados. Cabe destacar que a diferencia de los FCE anuales estos valores son diarios.

4.2.3 Determinación del número de días esperado de episodios críticos

Es necesario estimar la probabilidad de que, dada una distribución de frecuencia de concentraciones promedio de 24hrs, la concentración de un día cualquiera supere el valor de los niveles definidos para los distintos niveles de excepción ambiental (ver Tabla 1-2).

El análisis se basó en lo reportado por (Morel et al. 1999) y consistió en simular una distribución anual de las concentraciones diarias para cada ciudad como una distribución lognormal, asumiendo una media igual al valor de la norma anual de MP_{2,5} (es decir se asume que se cumple la norma anual) y una desviación estándar tal que el valor de α (cociente entre concentración media

anual y percentil 98) sea un determinado valor. Para las ciudades en análisis al norte de La Calera se asumió un valor de α igual a 2, para las ciudades al sur de Chillán se supuso un valor de 4. Para las ciudades de la zona central se asumió un valor de α de 3.

A continuación se presenta el número de días esperado de episodios críticos por año²³ para las zonas en análisis, considerando como media de concentraciones anual la concentración al 2010 para la situación actual y como la norma para los periodos en análisis (25ug/m³, 20ug/m³, 10ug/m³ para los periodos 2012-2021, 2022-2031 y 2032-2041 respectivamente).

Tabla 4-4 Número Esperado de días con episodios críticos al año

Periodo	Ciudades/Zona	Episodio		
		Alerta	Preemergencia	Emergencia
Actual (concentraciones Actuales)	Norte	0,0	0,0	0,0
	Centro	0,7	0,2	0,0
	Gran Santiago	5,3	1,8	0,3
	Sur	5,0	2,5	0,8
2012-2021 (media anual=25 ug/m ³)	Norte	0,0	0,0	0,0
	Centro	0,7	0,2	0,0
	Gran Santiago	2,1	0,6	0,1
2022-2031 (media anual=20 ug/m ³)	Sur	5,0	2,5	0,8
	Norte	0,0	0,0	0,0
	Centro	1,2	0,2	0,0
	Gran Santiago	1,3	0,3	0,0
2032-2041 (media anual=10 ug/m ³)	Sur	3,9	1,6	0,3
	Norte	0,0	0,0	0,0
	Centro	0,2	0,0	0,0
	Gran Santiago	0,2	0,0	0,0
	Sur	1,2	0,2	0,0

Fuente: Elaboración propia

²³ Proviene de la multiplicación de la probabilidad de ocurrencia de un episodio crítico por el número de días en un año

4.3 Análisis Medidas de GEC

A continuación se describe el análisis realizado para cada una de las medidas. Mayor detalle del análisis se presenta en el anexo 8.9.

4.3.1 Medida 1: Restricción Vehicular para Vehículos Livianos

4.3.1.1 Descripción de la medida

Para el análisis de restricción vehicular se consideró solamente vehículos livianos particulares, los que corresponden al grueso del número de vehículos paralizados. La medida contempla un mayor número de dígitos restringidos para días considerados como episodios críticos de contaminación ambiental y rige desde las 7:30 A.M hasta las 9 P.M.

La siguiente tabla muestra el número de dígitos paralizados según situación. Para regiones, dado que no existe restricción vehicular actualmente, se asumió que la implementación vendrá dada por la diferencia respecto a la restricción permanente en la RM.

Tabla 4-5 Número de dígitos paralizados según episodio

Situación	Región Metropolitana		Regiones	
	SSV	CSV	SSV	CSV
Permanente	4	0	0	0
Alerta	4	0	0	0
Preemergencia	6	2	2	2
Emergencia	8	4	4	4

Nota: CSV con Sello verde, SSV sin sello verde

La evaluación de esta medida para la Región Metropolitana está basada en DICTUC (2008) y CONAMA (CONAMA 2010) que corresponde a un análisis de la medida y sus efectos. Para aplicar los resultados al resto de las zonas

Relación de la norma de calidad primaria MP 2,5 con la norma de calidad primaria de MP 10

analizadas se utilizó la información de parque automotriz reportada en INE (2008). El detalle de esta transferencia se explica más adelante.

Como supuestos se considerará sólo la restricción para días hábiles y un 100% de cumplimiento de la medida.

4.3.1.2 Variable de control

La variable de control o "*driver*" para la evaluación de esta medida corresponde al número de vehículos que paralizan en un día de episodio (alerta, preemergencia o emergencia).

El parque de vehículos y su proyección para la RM proviene de lo realizado en DICTUC (2008) . Para estimar el parque de vehículos y su proyección para otras ciudades se calculó la relación respecto al total de la RM a partir de lo reportado en INE (2008), manteniendo la misma proporción para todo el periodo de análisis.

A continuación se muestra el parque vehicular restringido para algunas de las ciudades analizadas para los años 2012 y 2021.

Relación de la norma de calidad primaria MP 2,5 con la norma de calidad primaria de MP 10

Tabla 4-6 Parque vehicular adicional (vehículo liviano particular) restringido por efecto de la restricción vehicular para GEC (veh/día) y parque total por ciudad

Zona	2012			2021		
	Total	Preemergencia	Emergencia	Total	Preemergencia	Emergencia
Tocopilla	2.013	403	805	2.682	536	1.073
La Serena-Coquimbo	46.770	9.354	18.708	62.291	12.458	24.916
Gran Valparaíso	134.868	26.974	53.947	179.624	35.925	71.849
Región Metropolitana	1.049.003	209.801	419.601	1.397.116	279.423	556.846
Gran Concepción	119.948	23.990	47.979	159.753	31.951	63.901
Gran Temuco	39.581	7.916	15.833	52.716	10.543	21.087

Fuente: Elaboración propia.

El nivel de actividad paralizado se estimó a partir del nivel de actividad reportado para la RM por DICTUC (2008). Como supuesto se ha considerado que la distancia diaria recorrida es igual para todas las zonas del país consideradas en el análisis.

4.3.1.3 Costos

Los costos generados por la aplicación de esta medida están asociados a los costos que incurre el usuario por la prohibición del uso de su automóvil en episodios de preemergencia o emergencia. Actualizando lo realizado por DICTUC (2008) , para la RM se considera un ahorro asociado a lubricantes, combustibles y neumáticos de \$33,3 por km y un costo asociado al cambio de modo de transporte de \$47,8 por km, lo que se traduce en un costo neto de \$14,5 por km. Para regiones se considera un ahorro asociado a lubricantes, combustibles y neumáticos de \$29,3 por km y un costo asociado al cambio de modo de transporte de \$62,1 por km, lo que se traduce en un costo neto de \$32,9 por km. En el capítulo 8.9.3 se encuentra más detalle sobre estos cálculos.

4.3.1.4 Reducción de emisiones

Las emisiones reducidas se calculan a partir de la multiplicación de las emisiones unitarias (gr/km) o factor de emisión del vehículo y de su nivel de actividad (km/día). El primer término depende del año de modelo del automóvil, tipo de combustible y hora del día del recorrido, y se basa en lo reportado por COPERT III modificado según DICTUC (2008) . El nivel de actividad depende solo del año de modelo y de la hora del día, y proviene de lo elaborado en DICTUC (2008). Se ha supuesto que los factores de emisión son iguales para todas las zonas analizadas

4.3.2 Medida 2: Paralización de Fuentes Fijas

4.3.2.1 Descripción de la medida

En preemergencia las fuentes fijas que les corresponde paralizar son aquellas que acreditaron mediante medición que sus concentraciones son superiores a 32 mg/m³N, mientras que para una episodio de emergencia paralizan las que poseen una concentración superior a 28 mg/m³N. Por otra parte, las fuentes fijas que poseen sus muestreos vencidos o no acreditados por la SEREMI de Salud quedan incluidas en el listado de paralización. Se asume que las condiciones que determinan la paralización de fuentes fijas en la RM se replican en el resto del país.

La evaluación de esta medida se realiza a partir de información correspondiente a la Región Metropolitana la cual es extrapolada a las demás zonas analizadas según el PIB industrial y el total de emisiones de MP₁₀ de cada una de ellas. El detalle de la metodología y supuestos de esta transferencia se explica en las siguientes secciones.

4.3.2.2 *Variable de control*

La variable de control o “*driver*” para la evaluación de esta medida corresponde al porcentaje emisiones totales que se reducen en un episodio crítico (preemergencia o emergencia) en cada una de las zonas seleccionadas para la evaluación.

4.3.2.3 *Efecto de la Medida*

El análisis de esta medida no se realiza a partir de un análisis unitario como ocurre con el resto de las medidas sino que considera un análisis agregado de las emisiones y costos totales por zona analizada. La metodología de estimación de emisiones y costos totales se detallan en las siguientes secciones.

4.3.2.4 *Costos*

La aplicación de esta medida genera costos de paralización del proceso productivo de las industrias o fuentes fijas afectadas por los periodos de preemergencia o emergencia.

Los costos fueron calculados en el análisis que realizó DICTUC (2001) para la RM donde se incorporó en el cálculo la flexibilidad temporal que poseen las empresas, ya que la paralización de una fuente fija en un episodio crítico no implica perder el total de su valor agregado ni tampoco tener que asumir como pérdida total los costos fijos. Esto debido a que la empresa puede trabajar horas extras o cambiar el día paralizado por otro día en la semana en el cual no se trabaja habitualmente.

Los costos estimados para la RM en DICTUC (2001) fueron actualizados al presente (año 2010) basándose en un factor de crecimiento del PIB Nacional entre los años 2000 y 2010 igual a 1,5. Se obtuvo un valor total de paralización de 1,75 MUSD para un episodio de preemergencia y de 7,23 MUSD para emergencia.

Relación de la norma de calidad primaria MP 2,5 con la norma de calidad primaria de MP 10

Para la transferencia de este costo al resto de las zonas consideradas se utilizó la razón entre el PIB Industrial de la zona analizada y el de la Región Metropolitana (año 2008). Para el cálculo del PIB Industrial por zona se supuso que el PIB Industrial de la región se distribuye uniformemente según el número de fuentes fijas que se ubica en cada una de las zonas. La siguiente ecuación muestra con mayor claridad el cálculo de la razón utilizada para estimar el costo de paralización por zona analizada.

$$Costo_{zona} = \left(\frac{PIB_{Ind_región}}{PIB_{Ind_RM}} \right) \cdot \left(\frac{FF_{totales\ zona}}{FF_{totales\ región}} \right) \cdot Costo_{RM} \quad \text{Ecuación 1}$$

La siguiente tabla muestra los costos utilizados para el año 2010 de algunas de las zonas analizadas.

Tabla 4-7 Costo de paralización unitario en un episodio crítico para las distintas zonas consideradas, año 2010.

Ciudad	Episodio	Costo de Paralización (MUSD/día)
Tocopilla	Preemergencia	0,06
	Emergencia	0,23
La Serena-Coquimbo	Preemergencia	0,06
	Emergencia	0,24
Gran Valparaíso	Preemergencia	0,88
	Emergencia	3,66
Región Metropolitana	Preemergencia	1,75
	Emergencia	7,23
Gran Concepción	Preemergencia	2,77
	Emergencia	11,47
Gran Temuco	Preemergencia	0,02
	Emergencia	0,06

Fuente: Elaboración Propia

Relación de la norma de calidad primaria MP 2,5 con la norma de calidad primaria de MP 10

Estos costos se proyectaron a lo largo del periodo de evaluación según la proyección del crecimiento del PIB estimado por el Banco Central el cual corresponde a un 4,8% anual.

4.3.2.5 Reducción de emisiones

El análisis de reducción total de emisiones por zona analizada se realizó a partir de la base de datos de fuentes fijas a nivel nacional, regional y comunal que contiene datos correspondientes al año 2008 provenientes de la SEREMI de Salud (2008). A partir de esta base de datos se estiman las emisiones totales anuales asociadas a las fuentes fijas para el año 2008 para cada una de las zonas analizadas correspondientes a los contaminantes PM₁₀, PM₂₅, NO_x, SO_x y NH₃.

Por otro lado, a partir de la información de CONAMA (2008) y CONAMA (2010) se obtiene que las emisiones totales de PM₁₀ en la RM se han reducido en promedio un 9% anual para el periodo 2008-2010. Se supuso, de manera conservadora, que la reducción durante el periodo de evaluación es de solo un 2% anual y que este valor se mantiene constante para todas las zonas analizadas. La siguiente tabla muestra las emisiones diarias totales de PM₁₀ para algunas zonas analizadas y su proyección a lo largo del periodo de evaluación.

Tabla 4-8 Emisiones PM₁₀ diarias totales (kg/día) según zona analizada

Zona	2008	2009	2010	2011
Tocopilla	2.753	2.644	2.390	2.204
La Serena-Coquimbo	52	49	45	41
Gran Valparaíso	2.463	2.365	2.138	1.972
Gran Santiago	4.162	3.997	3.613	3.333
Gran Concepción	40.507	38.903	35.165	32.435
Gran Temuco	785	754	682	629

Fuente: Elaboración propia en base a Base de Datos SEREMI de Salud (2008)

Relación de la norma de calidad primaria MP 2,5 con la norma de calidad primaria de MP 10

Las emisiones reducidas en un día de episodio crítico en la RM para el año 2010 corresponden, para preemergencia y emergencia, a un 40% y un 46% respectivamente (CONAMA 2010). Estos porcentajes se han mantenido constantes a lo largo del periodo de evaluación para el Gran Santiago mientras que para las demás ciudades analizadas se ha supuesto una reducción del 30% de las emisiones de PM₁₀ en preemergencia y de un 50% en emergencia.

Para el cálculo de la reducción de emisiones del resto de los contaminantes relevantes se ha considerado la razón entre las emisiones totales de estos y las emisiones de PM₁₀ de cada una de las zonas analizadas obtenida a partir de la base de datos de la SEREMI de Salud. Dicha razón se ha mantenido constante a lo largo del periodo de evaluación. La siguiente tabla muestra la reducción diaria de emisiones según los diferentes contaminantes, para episodios de preemergencia y emergencia, para alguna de las zonas analizadas y su proyección en el tiempo.

Tabla 4-9 Reducción de emisiones de los contaminantes relevantes (ton/día) para un día de episodio crítico según zona analizada.

Ciudades	Episodio	Año 2012			
		PM25	SOX	NH3	NOX
Tocopilla	Preemergencia	0,39	32,36	0,84	0,61
	Emergencia	0,66	53,93	1,39	1,01
La Serena-Coquimbo	Preemergencia	0,01	0,09	0,00	0,03
	Emergencia	0,01	0,15	0,00	0,05
Gran Valparaíso	Preemergencia	0,52	1,05	0,04	0,75
	Emergencia	0,87	1,75	0,06	1,25
Gran Santiago	Preemergencia	1,40	9,94	0,36	12,08
	Emergencia	1,59	11,33	0,41	13,75
Gran Concepción	Preemergencia	4,57	22,55	0,89	11,23
	Emergencia	7,62	37,58	1,48	18,72
Gran Temuco	Preemergencia	0,19	0,01	0,08	0,13
	Emergencia	0,31	0,01	0,14	0,21

Fuente: Elaboración Propia

4.3.3 Medida 3: Prohibición funcionamiento estufas a leña

4.3.3.1 Descripción de la medida

La medida contempla la prohibición de utilizar cualquier tipo de calefactores a leña, estén o no provistos de doble cámara de combustión, en todo el territorio afectado durante episodios críticos de alerta, pre emergencia y emergencia ambiental. La prohibición no se considera para artefactos a leña que se utilizan para cocinar.

La paralización de los calefactores a leña rige por un periodo de 24 horas, renovables y a partir de las 00:00 horas del día para el cual se declara el episodio crítico.

La evaluación de esta medida se realiza principalmente a partir de información correspondiente a la Región Metropolitana. Para las regiones sin información se extrapola la información de la RM, a partir de la población de las distintas regiones. No fue considerado en el análisis las Regiones I, II y III, debido al bajo uso de leña y a la escasa información disponible.

4.3.3.2 Variable de control

La variable de control o "*driver*" para la evaluación de esta medida corresponde al número de estufas que dejan de funcionar por la prohibición en un episodio crítico (alerta, preemergencia o emergencia) en cada una de las regiones analizadas en la evaluación.

4.3.3.3 Efecto de la Medida

Para estimar el número de artefactos a leña que paralizan debido a la existencia de un episodio crítico se utilizó como referencia el estudio realizado por Ambiente Consultores (2007) en donde, para el año 2006, se entrega un catastro

del número de artefactos para calefacción que utilizan leña en las regiones IV a la XII y la distribución del parque de acuerdo a los tipos de artefactos.

Para la proyección de ventas de artefactos a leña se ha considerado las ventas reportadas por (Ambiente Consultores 2007) para la RM en el año 2006, las cuales ascienden a 8.600 artefactos. Para obtener las ventas base del resto de las regiones analizadas se asumió que las ventas cumplían con la misma proporción existente entre el parque base y las ventas de artefactos de la Región Metropolitana (ver Anexo 8.9.4, Tabla 8-26)

Las ventas de artefactos en la RM fueron actualizadas al año 2010, considerando una tasa de crecimiento del 3,2%, de acuerdo a lo estimado por (GAMMA Ingenieros S.A. 2007). Para las regiones IV a V, se asumió un crecimiento de las ventas del 2%. Para el resto de las regiones del País se asumió un 2,5%.

La categorización de artefactos utilizada para el análisis corresponde a la definición de artefacto tipo utilizado por (Ambiente Consultores 2007), en la que se asocia a cada artefacto típico una tecnología, factor de emisión y eficiencia determinada.

Tabla 4-10 Categorización artefactos a leña

Tipo Calefactor	Descripción	FE Real (mg/M)	Eficiencia (%)
I	Salamandra o estufa artesanal	1.778	50
H	Estufa combustión simple	1.010	55
G	Estufa doblecámara básica	556	60
F	Estufa doblecámara 5 g/hr	299	65
E	Estufa doblecámara 3 g/hr	143	70
D	Estufa doblecámara y tiro forzado 2g/hr	74	75
C	Estufa pellets	35	80
B	Estufa pellets avanzada	16	85
A	Futura tecnología	9	90

Nota: Los factores de emisión obtenidos en laboratorio fueron corregidos para caracterizar la emisión real de los artefactos considerando la humedad de la leña y los modos de operación en condiciones diferentes al ensayo de laboratorio. Las emisiones reales corresponden a 5 veces las emisiones de laboratorio.

Fuente: (Ambiente Consultores 2007)

A partir de la información anterior se obtuvo la proyección del parque de artefactos para las distintas regiones del País. Para obtener la proyección de artefactos a leña a nivel de zonas²⁴, se multiplicó a las proyecciones regionales la proporción existente entre la población de cada zona y la población de la región a la cual pertenece.

La siguiente tabla muestra el parque de artefactos a leña que paralizarán por efecto de la aplicación de esta medida en algunas de las zonas analizadas. Aunque la medida ordena que todos los artefactos deben paralizar, debido a la diferencia en fiscalización, se asumió que en alerta y preemergencia paraliza sólo el 50%, mientras que emergencia paraliza el 80%.

²⁴ Estas corresponden a ciudades y en algunos casos a conglomerados de comunas como es el caso de Gran Temuco o Gran Concepción.

Relación de la norma de calidad primaria MP 2,5 con la norma de calidad primaria de MP 10

Tabla 4-11 Proyección de artefactos que utilizan leña que paralizarán para algunas de las zonas analizadas en episodios críticos.

Zona	Episodio	2010	2012	2021
La Serena-Coquimbo	Alerta y Preemergencia	16.024	17.868	34.646
	Emergencia	25.638	28.588	24.543
Gran Valparaíso	Alerta y Preemergencia	11.351	12.659	97.255
	Emergencia	18.162	20.254	114.761
Región Metropolitana	Alerta y Preemergencia	36.390	45.759	43.039
	Emergencia	58.224	73.214	34.646
Gran Concepción	Alerta y Preemergencia	53.157	58.965	24.543
	Emergencia	85.052	94.345	97.255
Gran Temuco	Alerta y Preemergencia	18.932	21.698	114.761
	Emergencia	30.292	34.716	43.039

Fuente: Elaboración Propia

4.3.3.4 Costos

Los costos generados por la aplicación de esta medida considera la utilización de equipos con otras tecnologías (estufas kerosene, estufas eléctricas y estufas a gas) durante los días con episodios críticos, por lo tanto incluye la inversión de un artefacto de respaldo (costo fijo) y el consumo incremental de combustible de reemplazo (costo variable).

La distribución de los equipos de reemplazo durante episodios críticos se basó en el porcentaje de la población perteneciente a los distintos grupos socioeconómicos del País, a partir del mapa socioeconómico Adimark, basado en Censo 2002. En la Tabla 4-12 se presenta la distribución de equipos de reemplazo y el criterio utilizado.

Tabla 4-12 Distribución equipos de reemplazo de calefactores a leña durante episodios críticos

Tipo Calefactor	Proporción (%)	Detalle
Kerosene	55	Proporción población grupo D y E
Gas Licuado	30	Proporción población grupo C3 y 12,6% grupo C2
Eléctrica	15	2,8% proporción grupo C2 más proporción población grupo ABC1

Fuente: Elaboración Propia a partir de mapa socioeconómico Adimark

El costo por uso de combustible para cada tipo de tecnología en la RM fue estimado a partir del consumo de leña entregado por (GAMMA Ingenieros S.A. 2007), el consumo de los combustibles de reemplazo reportados por (Villena, Villena et al. 2007), ajustados en un 15%, para que los valores fueran coherentes al consumo de leña reportados por GAMMA y a los precios de los combustibles entregados por la CNE para el año 2008. Es importante notar que el calor entregado por la utilización de los combustibles de reemplazo no es constante para todos ellos sino que se asume una elasticidad por cambio de combustible que ya está incluida en los valores entregados por (Villena, Villena et al. 2007). A continuación se presenta el costo incurrido por uso de combustible por día para cada tipo de artefacto.

Tabla 4-13 Costo de combustible por tipo de tecnología (CLP/estufa-día)

Tecnología	Costo (CLP/ estufa-día)
Leña	572
Kerosene	896
Gas	1.118
Electricidad - Halógena	852
Electricidad - Óleoeléctrica	1.278

Fuente: Elaboración propia en base a GAMMA Ingenieros S.A. (2007), Villena, Villena et al. (2007) y CNE (2008)

Relación de la norma de calidad primaria MP 2,5 con la norma de calidad primaria de MP 10

El costo de paralización por equipo en un día de episodio crítico se obtuvo ponderando el costo incremental por consumo de combustible (costo combustible reemplazo menos costo leña) de acuerdo a la distribución de artefactos de reemplazo descrita en la Tabla 4-12. A continuación se presenta el costo de paralización por equipo en un día de episodio crítico para algunas de las zonas analizadas.

Tabla 4-14 Costo unitario de paralización en un episodio crítico para distintas zonas consideradas (\$ CLP/ (día * equipo))

Ciudad	La Serena - Coquimbo	Gran Valparaíso	RM	Gran Concepción	Gran Temuco
Costo unitario	208	249	416	873	873

Por otra parte el costo fijo de paralización de un artefacto a leña asciende a \$4.443 CLP por equipo paralizado. Este valor corresponde al costo anualizado de la inversión ponderado de acuerdo a la distribución de los equipos de reemplazo durante episodios críticos considerada y es independiente del número de días con episodios críticos. Se consideró una tasa de descuento del 6% y una vida útil para las estufas a leña, Kerosene, eléctricas y a gas de 30, 15, 15 y 10 años respectivamente. Para mayor detalle ver anexo 8.9.4.2.

Se ha considerado que este costo se mantiene constante para todo el periodo de evaluación del estudio.

4.3.3.5 Reducción de emisiones

A partir de la distribución de los equipos de reemplazo durante episodios críticos, del consumo de leña por artefacto, de su eficiencia y del poder calorífico de la leña (19.228 MJ/kg²⁵) se obtuvo el consumo de energía²⁶. De esta

²⁵ Poder calorífico suponiendo combustión completa sin calor de condensación (Low Heating Value) para leña seca. CONAMA RM (2008). Anteproyecto de revisión, reformulación y

Relación de la norma de calidad primaria MP 2,5 con la norma de calidad primaria de MP 10

manera la reducción total de emisiones se obtiene a partir del consumo de energía que debe satisfacer cada artefacto, la que se asume se mantiene constante y la diferencia existente entre los factores de emisión de los artefactos de leña y de los artefactos reemplazantes con otras tecnologías. Para mayor detalle ver anexo 8.9.4.

En la Tabla 4-15 se presenta la reducción de emisión de MP_{2,5} por artefacto promedio por día de episodio crítico. Es importante destacar que las emisiones obtenidas fueron ajustadas de acuerdo al inventario de emisiones de Temuco, Concepción y Santiago reportado por DICTUC (2008).

Tabla 4-15 Reducción de Emisión diaria de MP_{2,5} promedio por tipo de artefacto por día de episodio crítico para algunas zonas consideradas (kg/estufa-día).

Zona Analizada	I	H	E	D
La Serena-Coquimbo	0,49	0,28	0,04	0,02
Gran Valparaíso	0,15	0,08	0,01	0,01
Región Metropolitana	0,91	0,52	0,07	0,03
Gran Concepción	6,83	3,87	0,52	0,25
Gran Temuco	6,48	3,67	0,49	0,24

Nota: Esta reducción considera un factor de emisión promedio de los artefactos de reemplazo (Kerosene, gas, electricidad) y considera el consumo de energía de cada zona.

4.4 Resultados Medidas GEC

En este capítulo se recopilan los resultados en términos de reducciones de emisiones y concentraciones, costos y beneficios por día de episodio crítico para la Región Metropolitana. Los resultados entregados corresponden al primer periodo de aplicación de la norma (2012-2021).

actualización del Plan de Prevención y de Descontaminación Atmosférica para la Región Metropolitana (PPDA).

²⁶ El consumo energético se calcula multiplicando el consumo de leña de cada artefacto por el poder calorífico y la eficiencia del equipo.

4.4.1 Reducción de Emisiones

A continuación se presentan las emisiones reducidas para el año 2012 de las diferentes medidas evaluadas. La siguiente tabla muestra las emisiones reducidas de MP_{2,5} para la prohibición de estufas a leña según episodio en ciudades seleccionadas para un día de episodio crítico .

Tabla 4-16 Reducción de emisiones de MP_{2,5} por día de episodio crítico para la prohibición de estufas a leña (ton/día). Año 2012.

Ciudad	Episodio	PM25
Tocopilla	Alerta y Preemergencia	0,0
	Emergencia	0,0
La Serena-Coquimbo	Alerta y Preemergencia	3,2
	Emergencia	5,1
Gran Valparaíso	Alerta y Preemergencia	0,7
	Emergencia	1,1
Gran Santiago	Alerta y Preemergencia	5,7
	Emergencia	9,1
Gran Concepción	Alerta y Preemergencia	26,0
	Emergencia	41,7
Gran Temuco	Alerta y Preemergencia	12,2
	Emergencia	19,6

Fuente: Elaboración Propia

Las diferencias en emisiones entre ciudades se deben a la diferencia en número y composición del parque en términos de tecnología (y por ende factor de emisión) y a las horas y estacionalidad de su uso. Destaca Gran Concepción debido al tamaño de su parque de estufas.

Relación de la norma de calidad primaria MP 2,5 con la norma de calidad primaria de MP 10

Tabla 4-17 Reducción de emisiones de MP2,5 por día de episodio crítico y tipo de contaminante para paralización de fuentes fijas (ton/día). Año 2012.

Ciudad	Episodio	PM25	NOX	SOX	CO	COV
Tocopilla	Preemergencia	0,4	0,6	32,4	3,3	0,1
	Emergencia	0,7	1,0	53,9	5,5	0,1
La Serena-Coquimbo	Preemergencia	0,0	0,0	0	0,0	0,0
	Emergencia	0,0	0,1	0	0,0	0,0
Gran Valparaíso	Preemergencia	0,5	0,8	1	0,3	0,4
	Emergencia	0,9	1,3	2	0,6	0,6
Gran Santiago	Preemergencia	1,4	12,1	10	5,0	8,5
	Emergencia	1,6	13,8	11	5,6	9,7
Gran Concepción	Preemergencia	4,6	11,2	23	11,7	0,2
	Emergencia	7,6	18,7	38	19,4	0,4
Gran Temuco	Preemergencia	0,2	0,1	0	0,5	0,0
	Emergencia	0,3	0,2	0	0,9	0,1

Fuente: Elaboración Propia

Las diferencias en emisiones entre ciudades para fuentes fijas se deben únicamente al número de fuentes fijas y sus respectivas emisiones diarias. Para esta medida fueron evaluadas tanto la reducción de emisiones de PM2.5 como la correspondiente a los contaminantes precursores de PM2.5.

A continuación se tabulan las reducciones de emisiones al año 2012 asociadas a la medida GEC de restricción vehicular para algunas ciudades seleccionadas por día de episodio crítico.

Relación de la norma de calidad primaria MP 2,5 con la norma de calidad primaria de MP 10

Tabla 4-18 Reducción de emisiones, debidas a la restricción vehicular, por tipo de contaminante y episodio (ton/día). Año 2012.

Ciudad	Episodio	PM25	NOX	SOX	CO	COV
Tocopilla	Preemergencia	0	0	0	0	0
	Emergencia	0	0	0	0,1	0
La Serena-Coquimbo	Preemergencia	0	0,1	0	0,8	0,1
	Emergencia	0	0,2	0	1,6	0,1
Gran Valparaíso	Preemergencia	0	0,2	0	2,4	0,2
	Emergencia	0	0,4	0	4,7	0,3
Gran Santiago	Preemergencia	0	1,7	0	18,3	1,3
	Emergencia	0	3,4	0	36,7	2,5
Gran Concepción	Preemergencia	0	0,2	0	2,1	0,1
	Emergencia	0	0,4	0	4,2	0,3
Gran Temuco	Preemergencia	0	0,1	0	0,7	0,0
	Emergencia	0	0,1	0	1,4	0,1

Fuente: Elaboración propia

Para el caso de restricción vehicular los factores de emisión y la distancia diaria recorrida por un vehículo se asumieron iguales para todas las ciudades, por lo que las diferencias de emisiones provienen de las diferencias en el número de vehículos en cada ciudad. Se puede notar que el aporte de los vehículos (gasolineros) en MP2,5 es despreciable frente a las emisiones de estufas y fuentes fijas.

A modo de comparación, la siguiente tabla muestra las reducciones de medidas GEC en términos de las emisiones totales de la ciudad. Estos valores se muestran para 3 ciudades según día de episodio crítico.

Tabla 4-19 Porcentajes de reducción de emisión por contaminante con respecto al total de emisiones de la ciudad. Año 2012.

Ciudad	Episodio	Medidas	PM25	NOX	SOX	CO	COV
Gran Santiago	Alerta	Estufas a Leña	36%				
		Estufas a Leña	36%				
	Preemergencia	Fuentes Fijas	9%	8,5%	27,1%	0,7%	2,5%
		RV	0%	1,2%	0,0%	2,5%	0,4%
	Emergencia	Estufas a Leña	57%				
		Fuentes Fijas	10%	9,7%	30,9%	0,8%	2,8%
RV	0%	2,4%	0,1%	5,1%	0,7%		
Gran Concepción	Alerta	Estufas a Leña	39%				
		Estufas a Leña	39%				
	Preemergencia	Fuentes Fijas	7%	18,1%	27,4%	2,3%	0,3%
		RV	0%	0,3%	0,0%	0,4%	0,2%
	Emergencia	Estufas a Leña	62%				
		Fuentes Fijas	11%	30,1%	45,7%	3,9%	0,4%
RV	0%	0,6%	0,0%	0,8%	0,3%		
Gran Temuco	Alerta	Estufas a Leña	28%				
		Estufas a Leña	28%				
	Preemergencia	Fuentes Fijas	0%	0,9%	0,3%	0,1%	0,0%
		RV	0%	0,5%	0,0%	0,1%	0,0%
	Emergencia	Estufas a Leña	45%				
		Fuentes Fijas	1%	1,5%	0,5%	0,2%	0,0%
RV	0%	0,9%	0,0%	0,2%	0,0%		

Fuente: Elaboración propia

Se observa que la paralización de estufas representa una disminución cercana al 40% de las emisiones de MP_{2,5} para Gran Santiago y Gran Concepción en alerta y preemergencia y cercana a 60% en episodio de emergencia. La menor disminución porcentual de emisiones en Gran Temuco (solo un 28% en alerta y preemergencia y un 45% en emergencia) en comparación con las otras dos ciudades se debe a que en la modelación solo se consideró la paralización de emisiones de combustión de leña asociadas a calefacción la cual es cercana a un 100% para Concepción y Santiago, mientras que en Temuco esto corresponde solo al 53%.

En cuanto a fuentes fijas su aporte en las reducciones de MP_{2,5} para preemergencia y emergencia es alrededor de un 10% para Gran Santiago y Gran Concepción, mientras que para Gran Temuco las reducciones no son relevantes con respecto al total de emisiones debido a que las fuentes fijas no tienen una participación importante en las emisiones de la ciudad. Con respecto a los otros contaminantes, en Gran Santiago y Gran Concepción estos reducen una fracción importante de las emisiones mientras que en Gran Temuco estas reducciones son cercanas al 0% de las emisiones totales.

Se observa además que el aporte en reducción de emisiones de la restricción vehicular es bajo para la mayoría de los contaminantes, no superando el 5% de reducción respecto al inventario.

4.4.2 Indicadores económicos

En esta sección se presentan los costos y beneficios asociados a las medidas que se activan en episodios críticos de contaminación atmosférica por MP_{2,5} y sus indicadores de rentabilidad. Estos indicadores se calculan para dos escenarios de beneficios²⁷: bajo (EBB) y alto (EBA).

4.4.2.1 Resultados por día de episodio crítico

Las siguientes tablas presentan los resultados obtenidos según el día de episodio crítico en términos de indicadores económicos y concentración reducida para ciudades seleccionadas al año 2012.

²⁷ Ver capítulo 2.2.3

Relación de la norma de calidad primaria MP 2,5 con la norma de calidad primaria de MP 10

Tabla 4-20 Indicadores económicos unitarios para un episodio de Alerta Ambiental, año 2012.

Ciudades	Reducción Conc (ug/m3)	Costo (MUSD)	Beneficio (MUSD)		Razón B/C		Beneficio Neto (MUSD)	
			Low	High	Low	High	Low	High
Tocopilla	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
La Serena-Coquimbo	0,8	0,0	0,0	0,1	1,6	8,5	0,0	0,1
Gran Valparaíso	5,4	0,0	0,1	0,7	21,8	107,8	0,1	0,7
Gran Santiago	27,9	0,0	3,6	20,1	99,1	545,4	3,6	20,0
Gran Concepción	24,4	0,1	0,5	2,8	5,1	28,0	0,4	2,7
Gran Temuco	34,6	0,0	0,2	1,3	6,4	36,5	0,2	1,3

Nota: Los costos asociados a estufas a leña sólo incluyen la componente variable, sin incluir la compra del equipo

Fuente: Elaboración propia

En alerta no existe paralización de fuentes fijas ni restricción adicional para vehículos livianos, por lo que los resultados están únicamente asociados a la prohibición de uso de estufas a leña. Por lo tanto, es de esperar que Tocopilla no exhiba reducciones ni costos o beneficios asociados.

Para el EBA y el EBB para el año 2012 los resultados apoyan la conveniencia de la aplicación de la medida para la situación de alerta ambiental al observarse beneficios netos positivos para todas las ciudades. Destacan Gran Santiago y Gran Valparaíso con los mejores indicadores B/C en ambos escenarios.

Relación de la norma de calidad primaria MP 2,5 con la norma de calidad primaria de MP 10

Tabla 4-21 Indicadores económicos unitarios para un episodio de Preemergencia Ambiental, año 2012.

Ciudades	Medida	Conc ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Costo (MUSD)	Beneficio (MUSD)		B/C		B. Neto (MUSD)	
				Low	High	Low	High	Low	High
Tocopilla	Estufas a Leña	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Fuentes Fijas	33,7	0,1	0,0	0,1	0,2	1,4	0,0	0,0
	RV	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Total	33,7	0,1	0,0	0,1	0,2	1,4	0,0	0,0
La Serena- Coquimbo	Estufas a Leña	1,1	0,0	0,0	0,1	2,1	11,6	0,0	0,1
	Fuentes Fijas	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	-0,1	-0,1
	RV	0,2	0,0	0,0	0,0	0,2	1,1	0,0	0,0
	Total	1,4	0,1	0,0	0,1	0,2	1,3	-0,1	0,0
Gran Valparaíso	Estufas a Leña	7,3	0,0	0,2	0,9	29,6	146,7	0,2	0,9
	Fuentes Fijas	6,6	1,0	0,2	0,8	0,2	0,8	-0,8	-0,2
	RV	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,3	0,0	0,0
	Total	14,0	1,0	0,3	1,7	0,3	1,7	-0,7	0,7
Gran Santiago	Estufas a Leña	37,9	0,0	5,0	27,3	134,9	742,2	4,9	27,3
	Fuentes Fijas	15,8	1,9	2,1	11,4	1,1	6,0	0,2	9,5
	RV	0,4	0,2	0,1	0,3	0,3	1,5	-0,2	0,1
	Total	54,1	2,2	7,1	39,0	3,3	18,1	4,9	36,8
Gran Concepción	Estufas a Leña	33,3	0,1	0,7	3,8	6,9	38,2	0,6	3,7
	Fuentes Fijas	21,6	3,0	0,4	2,5	0,1	0,8	-2,6	-0,6
	RV	0,2	0,0	0,0	0,0	0,1	0,6	0,0	0,0
	Total	55,0	3,2	1,1	6,3	0,4	2,0	-2,0	3,1
Gran Temuco	Estufas a Leña	47,1	0,0	0,3	1,8	8,7	49,6	0,3	1,8
	Fuentes Fijas	0,8	0,0	0,0	0,0	0,3	1,8	0,0	0,0
	RV	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
	Total	47,9	0,1	0,3	1,8	5,0	28,8	0,3	1,8

Nota: los costos asociados a estufas a leña sólo incluyen la componente variable, sin incluir la compra del equipo

Fuente: Elaboración propia

Para el año 2012 la aplicación de medidas para un EBA en episodio de preemergencia es conveniente de manera agregada (considerando

1060 VTA

Relación de la norma de calidad primaria MP 2,5 con la norma de calidad primaria de MP 10

conjuntamente todas las medidas) para todas las ciudades seleccionadas, a excepción Tocopilla y La Serena-Coquimbo que poseen un beneficio neto cercano a 0. Gran Santiago destaca por un beneficio neto de 36,8 millones de USD, debido principalmente a la prohibición de estufas a leña.

Al analizar el EBB sólo Gran Temuco y Gran Santiago presentan un beneficio neto positivo, con valores de 4,9 millones de USD y 300 mil USD respectivamente. Destaca Gran Concepción con el menor beneficio neto asociado al beneficio neto negativo de paralización de fuentes fijas.

Relación de la norma de calidad primaria MP 2,5 con la norma de calidad primaria de MP 10

Tabla 4-22 Indicadores económicos unitarios para un episodio de Emergencia Ambiental, año 2012.

Ciudades	Medida	Conc (ug/m3)	Costo (MUSD)	Beneficio (MUSD)		B/C		B. Neto (MUSD)	
				Low	High	Low	High	Low	High
Tocopilla	Estufas a Leña	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Fuentes Fijas	85,0	0,3	0,0	0,2	0,1	0,9	-0,2	0,0
	RV	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Total	85,0	0,3	0,0	0,2	0,1	0,9	-0,2	0,0
La Serena- Coquimbo	Estufas a Leña	2,8	0,0	0,0	0,2	3,2	17,6	0,0	0,2
	Fuentes Fijas	0,2	0,3	0,0	0,0	0,0	0,1	-0,3	-0,2
	RV	0,6	0,0	0,0	0,0	0,3	1,7	0,0	0,0
	Total	3,6	0,3	0,0	0,3	0,2	0,9	-0,2	0,0
Gran Valparaíso	Estufas a Leña	17,7	0,0	0,4	2,2	44,9	222,3	0,4	2,2
	Fuentes Fijas	16,6	4,0	0,4	2,0	0,1	0,5	-3,6	-2,0
	RV	0,3	0,1	0,0	0,0	0,1	0,4	-0,1	0,0
	Total	34,6	4,1	0,9	4,2	0,2	1,0	-3,2	0,2
Gran Santiago	Estufas a Leña	91,9	0,1	12,0	66,2	204,4	1.124,6	12,0	66,1
	Fuentes Fijas	27,3	7,9	3,6	19,7	0,5	2,5	-4,3	11,8
	RV	1,3	0,4	0,2	0,9	0,4	2,3	-0,2	0,5
	Total	120,5	8,4	15,8	86,8	1,9	10,4	7,4	78,4
Gran Concepción	Estufas a Leña	80,6	0,2	1,7	9,2	10,5	57,8	1,5	9,0
	Fuentes Fijas	54,5	12,5	1,1	6,2	0,1	0,5	-11,4	-6,3
	RV	0,5	0,1	0,0	0,1	0,2	0,9	-0,1	0,0
	Total	135,6	12,7	2,8	15,5	0,2	1,2	-9,9	2,7
Gran Temuco	Estufas a Leña	114,2	0,1	0,8	4,4	13,1	75,2	0,7	4,3
	Fuentes Fijas	1,9	0,1	0,0	0,1	0,2	1,1	-0,1	0,0
	RV	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
	Total	116,1	0,1	0,8	4,5	5,3	30,1	0,6	4,3

Nota: los costos asociados a estufas a leña sólo incluyen la componente variable, sin incluir la compra del equipo.

Fuente: Elaboración propia

En el caso de un episodio de emergencia y un EBA al año 2012 vuelven a aparecer las ciudades de Tocopilla y La Serena-Coquimbo como ciudades con beneficio neto negativo cercano a cero. En las demás ciudades los resultados

apoyan la implementación de las medidas, destacando Gran Santiago con un beneficio neto de 78,4 millones de USD y una relación B/C de 10,4. En segundo lugar está Gran Temuco con un beneficio neto de 4,3 millones de USD y una relación B/C de 30,1.

Para el EBB Gran Santiago continua con indicadores favorables, al igual que Gran Temuco con un beneficio neto de 7,4 y 0,6 millones USD respectivamente. Para Gran Valparaíso este escenario no le es favorable pues debido a la paralización de fuentes fijas muestra un beneficio neto negativo de 3,2 millones de USD. Destaca Gran Concepción por la magnitud de su beneficio neto negativo de 9,9 millones de USD y por una relación B/C de 0,2.

El comportamiento relativo de las ciudades en emergencia es similar al comportamiento evidenciado en preemergencia, destacando Gran Santiago como la ciudad más favorecida y Gran Concepción como la menos beneficiada. Para ambos tipos de episodio es la medida asociada a leña la que mayor beneficio neto aporta. Cabe destacar que para esta medida sólo se incluye la componente variable de los costos, sin incluir la compra del equipo. La paralización de fuentes fijas y la restricción vehicular muestran para la mayoría de los casos beneficios netos negativos.

4.4.2.2 Resultados según número esperado de días de episodios críticos

El análisis anterior se focalizó en los resultados para un día de paralización al año 2012 para ciudades seleccionadas. A continuación se presentan los resultados de valor presente de beneficios y costos para el primer periodo de análisis (2012-2021) considerando el número esperado de días de episodios presentados en la Tabla 4-4 para las 52 ciudades del país en análisis. Es decir, estos resultados provienen de la multiplicación del número esperado de días de episodio crítico por los valores unitarios diarios.

Relación de la norma de calidad primaria MP 2,5 con la norma de calidad primaria de MP 10

La siguiente tabla presenta el valor presente de los flujos de costos y beneficios, el beneficio neto y la razón B/C asociada para el primer periodo de evaluación (2012-2021).

Tabla 4-23 Valor presente (VP) de beneficios y costos según episodio crítico y medida GEC.

Episodio	Medida	Costo (MUSD)	Beneficio (MUSD)		B/C		B. Neto (MUSD)	
			Low	High	Low	High	Low	High
Alerta	Estufas a Lena	18	134	738	7.4	40.8	116	720
	Total	18	134	738	7.4	40.8	116	720
Preemergencia	Estufas a Lena	8	63	350	8.0	44.1	55	342
	Fuentes Fijas	101	20	113	0.2	1.1	-81	11
	RV	3	0	2	0.1	0.6	-2	-1
	Total	112	84	464	1	4.1	-27.8	352
Emergencia	Estufas a Lena	4	32	175	8.8	49.1	28	172
	Fuentes Fijas	120	10	54	0.1	0.5	-110	-66
	RV	1	0	1	0.1	0.6	-1	0
	Total	125	41	230	0.3	1.8	-83	106
Costo Fijo Estufas		69						
Total		324	259	1,432	0.8	4.4	-64	1,108

Fuente: Elaboración Propia. Tasa de descuento 6%. 1US\$=517 CLP\$

Es importante destacar que el costo total de GEC incluye el costo en que se incurre por una sola vez, en el caso de la medida de leña, por la compra de artefactos de respaldo, el cual es independiente del número de episodios.

Al analizar el valor presente de los indicadores económicos en el caso del EBA se observan beneficios sociales positivos solo para las medidas de leña para todos los tipos de episodios críticos, siendo la situación de alerta la que resulta más conveniente. De manera contraria, la medida de paralización de fuentes fijas solo posee beneficios netos positivos en preemergencia mientras que la medida de restricción vehicular no presenta beneficios en ningún caso.

Relación de la norma de calidad primaria MP 2,5 con la norma de calidad primaria de MP 10

Para EBB la situación es similar que para el caso anterior, se mantiene la misma tendencia con respecto a los beneficios netos, obteniéndose también un beneficio neto negativo en la paralización de fuentes fijas en preemergencia. Las razones B/C disminuyen aún más. En este escenario nuevamente la situación de alerta es la que presenta mayores beneficios para el caso de la medida de leña.

El fenómeno de valores absolutos mayores para alerta ambiental se debe al mayor número esperado de días de episodio. Esto mismo aplica para la diferencia de magnitudes entre preemergencia y emergencia.

5 ANÁLISIS DE LA CONVENIENCIA DE MANTENER LA NORMA ANUAL DE MP10

La norma de material particulado fino MP2,5 se aplica sobre la fracción más agresiva para la salud en cuanto a efectos crónicos, por lo que es pertinente preguntarse si es necesario mantener la norma anual de MP10, ya que de existir la norma de MP2,5, la norma de MP10 solo serviría para controlar la fracción gruesa MP10-2,5. Además, dado que la norma de MP2,5 es cada vez más estricta, el efecto de la norma de MP10 se haría sentir principalmente en el primer periodo de aplicación de la norma, entre 2012 y 2021. Para responder esta pregunta, se analizó el caso en que se elimina la norma anual de MP10.

Lo primero es analizar el efecto que tiene la actual norma de PM10 en las concentraciones de MP2,5. Al cumplir la norma de PM10 se reducen también las concentraciones de MP2,5. La magnitud de estas reducciones depende de las particularidades de la localidad, de la relación entre la fracción fina y gruesa del MP, y también, de los costos de reducción de las fuentes emisoras.

La siguiente figura muestra las concentraciones de MP2,5 que resultan en la situación con norma anual de PM10= 50 ug/m³ y norma diaria=120 ug/m³ al año 2012. Se destacan aquellas ciudades con valores en el rango de 20 a 25 ug/m³ de PM2,5.

Los resultados varían según la zona del país. En la zona norte, donde predomina la fracción gruesa del MP, solo dos ciudades superan los 20 ug/m³, y solo una supera 15 ug/m³ de MP2,5. En este caso es claro que la norma de PM2,5 no tiene un efecto relevante, tal como se ha visto en los resultados mostrados en la sección anterior.

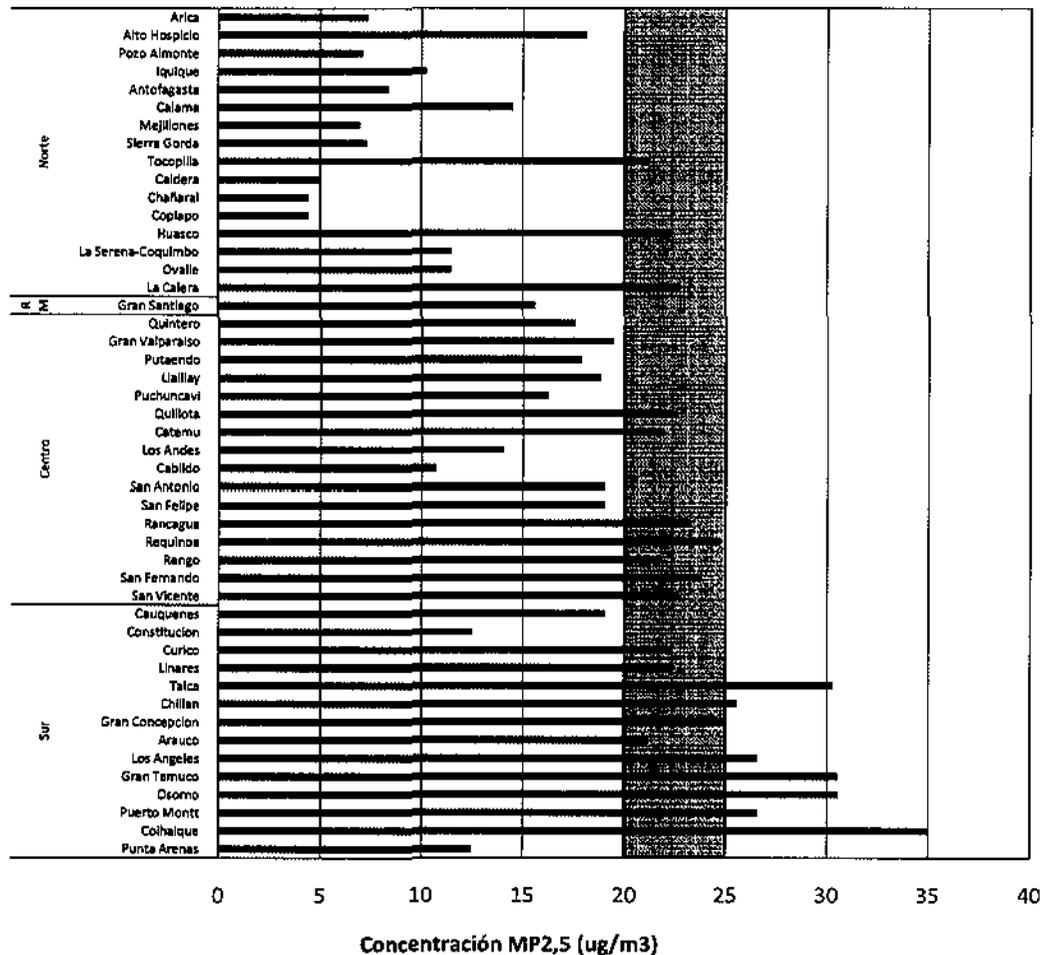
Relación de la norma de calidad primaria MP 2,5 con la norma de calidad primaria de MP 10

En la zona sur la situación es opuesta. Se observa que la mayoría de las ciudades del sur superan los 20 ug/m³ y cerca de la mitad los 25 ug/m³. Lo anterior es evidencia de que en el sur la fracción fina del material particulado predomina frente a la fracción gruesa. La norma de MP2,5 tiene un efecto importante en este caso.

En la zona central casi todas las ciudades se encuentran sobre los 15 ug/m³, y la mayoría entre los 20 y 25 ug/m³ de MP2.5. En este caso también la norma de MP2,5 tendrá un efecto importante.

Relación de la norma de calidad primaria MP 2,5 con la norma de calidad primaria de MP 10

Figura 5-1 Concentraciones de PM2.5 que resultarían al cumplir con la norma actual de PM10 (ug/m3).



Fuente: Elaboración propia

El caso del Gran Santiago es relevante. Dada la fracción gruesa existente, y que la mayoría de las medidas para reducir MP10 apuntan a reducir el MP2,5 (hay pocas medidas que ataquen directamente la fracción gruesa), la concentración de MP2,5 resultante de la aplicación de la norma actual de MP10 es de un poco más de 15 ug/m3. En esta situación, la norma de MP2,5 nueva no tendría ningún efecto sobre las concentraciones en Santiago.

Relación de la norma de calidad primaria MP 2,5 con la norma de calidad primaria de MP 10

La siguiente tabla muestra los principales indicadores por zona del país para el primer periodo de implementación de la norma. Se muestra el caso actual (solo norma de MP10) y el caso con norma de MP2,5, y el caso en que se elimina la norma de MP10. Para este último caso se incluyó también un escenario con norma de MP2,5 igual a 20 ug/m³, debido a que, según la figura mostrada anteriormente, la norma de 25 ug/m³ no tiene mayor efecto en muchas ciudades. En el anexo 8.10 se puede apreciar una tabla similar pero que presenta los resultados de una manera diferente.

Tabla 5-1 Casos evitados de mortalidad largo plazo, Valor Presente de Costos y Beneficios según zona del país, para el primer periodo de implementación (2012-2021), para diferentes escenarios de normas de MP2,5 y MP10 (Millones de US\$).

Zona	Valor Norma PM10	Valor Norma PM2.5	Conc. Promedio PM _{2.5} (ug/m ³)	Casos Evitados MLP	VP Beneficios	VP Costos	Ben Neto	Razón B/C
Norte	50 ug/m ³	Sin Norma	10,7	77	54	16	38	3,4
		25 ug/m ³	10,7	77	54	16	38	3,4
	Sin Norma	25 ug/m ³	10,9	0	0	0	-0	0,0
		20 ug/m ³	10,7	90	63	32	32	2,0
Centro	50 ug/m ³	Sin Norma	19,8	483	341	2.260	-1.920	0,2
		25 ug/m ³	19,8	483	338	2.260	-1.930	0,1
	Sin Norma	25 ug/m ³	20,1	361	254	485	-231	0,5
		20 ug/m ³	19,1	782	550	2.880	-2.330	0,2
Gran Santiago	50 ug/m ³	Sin Norma	15,6	29.400	20.600	4.800	15.800	4,3
		25 ug/m ³	15,6	29.400	20.600	4.780	15.800	4,3
	Sin Norma	25 ug/m ³	25,0	12.200	8.610	212	8.400	40,6
		20 ug/m ³	20,0	21.400	15.100	1.120	14.000	13,4
Sur	50 ug/m ³	Sin Norma	25,7	855	593	12	581	49,0
		25 ug/m ³	24,1	2.310	1.610	107	1.500	15,0
	Sin Norma	25 ug/m ³	24,1	2.310	1.610	107	1.500	15,0
		20 ug/m ³	19,5	6.390	4.450	538	3.910	8,3
Total	50 ug/m ³	Sin Norma	17,7	30.800	21.600	7.080	14.500	3,1
		25 ug/m ³	17,4	32.200	22.600	7.170	15.400	3,2
	Sin Norma	25 ug/m ³	22,1	14.900	10.500	804	9.670	13,0
		20 ug/m ³	18,4	28.600	20.100	4.580	15.600	4,4

Fuente: Elaboración Propia Tasa de descuento 6%. 1US\$=517 CLP\$

Nota: Concentración PM_{2.5} calculada como un promedio ponderado por población de las ciudades analizadas. Tasa de descuento 6%. 1US\$=517 CLP\$. Periodo: 2012-2021. Valor de

Relación de la norma de calidad primaria MP 2,5 con la norma de calidad primaria de MP 10

norma diaria de PM10 = 120 ug/m³ (situación base) y 150 ug/m³ (con alternativas de norma de MP_{2,5}). Valores con 3 cifras significativas.

Los resultados muestran que mantener la norma de MP10 para el primer periodo tiene un efecto positivo tanto en el Centro como en el Gran Santiago, pero no tiene mayor efecto para las zonas Norte y Sur. En la zona norte, de derogarse la norma de MP10, no se requeriría de ningún esfuerzo de descontaminación, ya que todas las ciudades analizadas la cumplirían automáticamente.

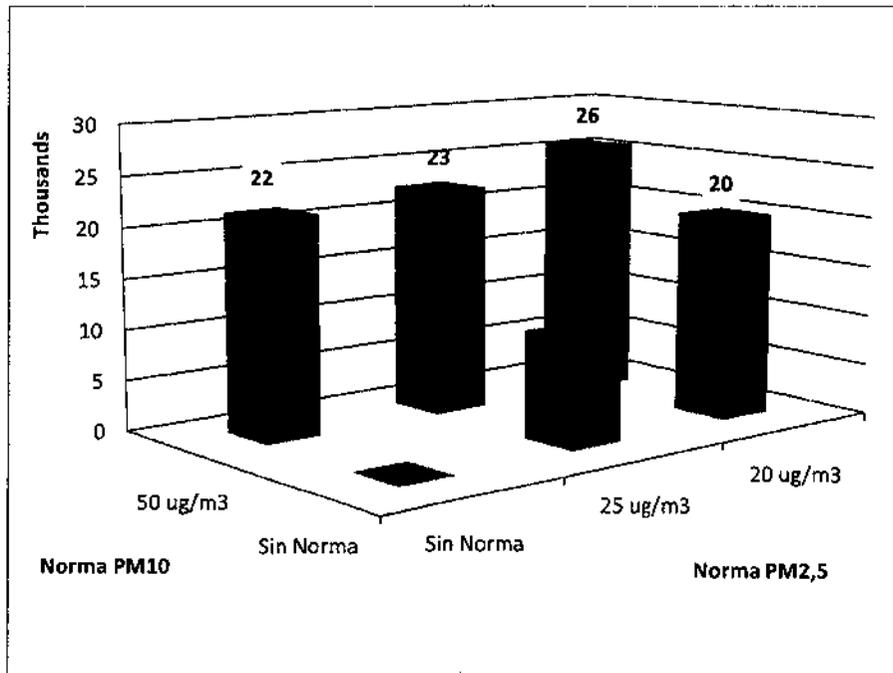
En el caso en que la norma de MP_{2,5} es de 25 ug/m³, para el Gran Santiago, al derogar la norma de MP10, la razón B/C aumenta de 4,3 a 40,6, pero el beneficio neto disminuye de aproximadamente 15,8 mil millones de dólares a solo 8,4 mil, lo que corresponde a una disminución del 47%. En la zona Sur la derogación de la norma implica mantener el beneficio neto respecto a la situación con norma y en la zona Centro el beneficio neto aumenta en unos 1.700 millones de USD. En la zona norte, la norma de MP_{2,5} al nivel de 25 ug/m³ básicamente no tiene ningún efecto. A nivel país la derogación de la norma de PM10 al nivel de norma de PM_{2,5} de 25 ug/m³ implica una disminución del beneficio neto en cerca unos 5.800 millones de USD, pero una mejora de la razón B/C desde 3,2 a 13.

La misma tendencia se observa para el caso en que la norma de MP_{2,5} fuese de 20 ug/m³, en que la no derogación de la norma de MP10 nuevamente tiene un efecto positivo para la zona Centro y para el Gran Santiago. Para esta última la derogación implica una disminución del beneficio neto de alrededor de 1.900 millones de USD respecto a la situación con norma de PM10, sin embargo, la razón B/C aumenta de 4,3 a 13,4. En la zona Norte y en la zona Sur la norma de MP_{2,5} al nivel de 20 ug/m³ no tiene ningún efecto relevante. En la zona Centro la derogación produce una disminución importante de costos, lo que redonda

en un aumento del beneficio neto en 1.000 millones de USD pero que sigue siendo negativo. A nivel país la derogación de la norma de PM10 al nivel de norma de PM2,5 de 20 ug/m³ implica una disminución del beneficio neto en cerca de unos 800 millones de USD, pero una mejora de la razón B/C desde 2.8 a 4.4.

La siguiente figura representa el beneficio neto de las diferentes alternativas de evaluación a nivel país donde se puede apreciar de forma esquemática los resultados expuestos anteriormente. A nivel país, la norma de MP2,5 de 25 ug/m³ no aumenta considerablemente el beneficio neto, mientras que la norma de 20 ug/m³ si lo hace, pero no de una manera importante. En cambio, la alternativa de derogación de norma de MP10 si disminuye fuertemente el beneficio neto especialmente en el caso de la norma de MP2,5 de 25 ug/m³.

Figura 5-2 Valor Presente del Beneficio Neto (MUSD) para el primer periodo de implementación (2012-2021), para diferentes escenarios de normas de MP2,5 y MP10



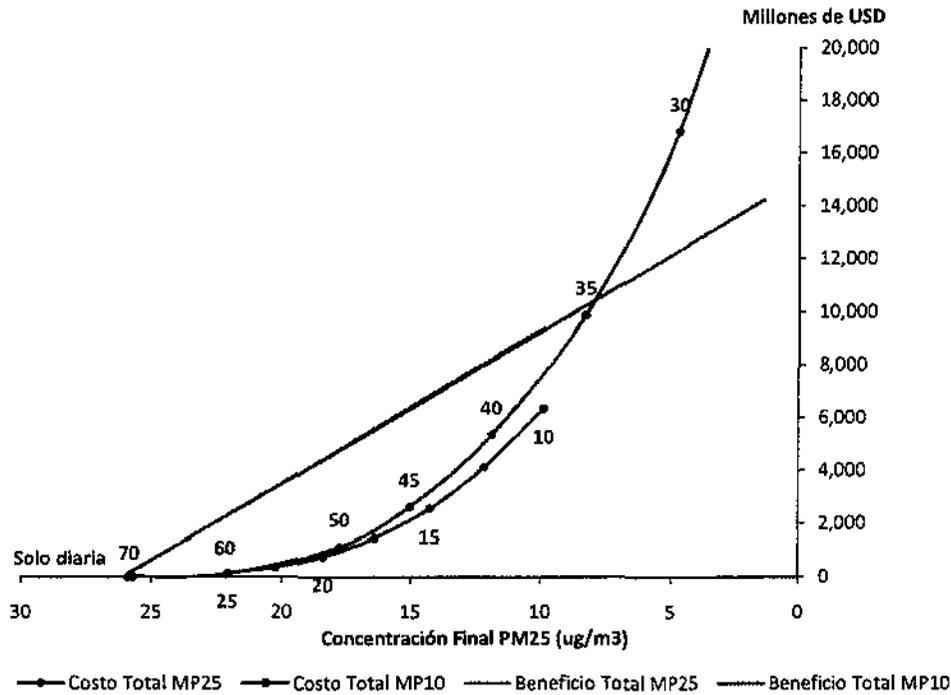
Fuente: Elaboración propia

Estos resultados se pueden explicar en base a dos fenómenos. Aunque reducir directamente el MP2,5 resulta más barato, debido a que se ataca el contaminante que produce los mayores efectos en salud, en las ciudades del centro y sur del país las medidas de reducción para el MP10 ya apuntan al MP2,5, debido a que no existen muchas medidas para reducir la fracción gruesa. Debido a esto, el ahorro de costos al enfocar las medidas al MP2,5 es menor al esperado. El segundo fenómeno tiene relación con el nivel de concentraciones que se logra con ambas normas. Como vimos en la figura anterior, la norma de MP10 actual resulta en concentraciones de MP2,5 menores que lo requerido por la norma en las ciudades del centro y sur del país. Si se deroga la norma de MP10, la reducción exigida resulta menor. Debido a la forma de las curvas de costo marginal (cuadrática) y de beneficio marginal (constante), una menor reducción resulta entonces en una razón beneficio/costo mayor.

Estos dos fenómenos se aprecian en la siguiente figura, que muestra el costo y beneficio total para los diferentes niveles de aplicación de una norma de MP10 o de MP2,5 en forma independiente, versus la concentración promedio de MP2,5 lograda en el país (ponderada por población expuesta).

Relación de la norma de calidad primaria MP 2,5 con la norma de calidad primaria de MP 10

Figura 5-3 Costo y Beneficio total de cumplimiento de la norma de MP10 y MP2,5, versus la concentración promedio nacional de MP2,5, para el año 2012. (Millones de US\$).



Fuente: Elaboración propia

Nota: Los números en gris corresponden al nivel de norma anual del contaminante respectivo.

La figura muestra que el costo de lograr una cierta concentración de MP2,5 es siempre mayor cuando se aplica una norma de MP10, pero también muestra que la norma actual de MP10 resulta en una concentración promedio de MP2,5 más baja que la norma propuesta para el año 2012. La norma de MP2,5 igual a 20 ug/m3 resultaría en concentraciones promedio más cercanas a la situación actual.

Las siguientes tablas muestran la misma información, además de los valores de costos y beneficios marginales que además se pueden observar en la Figura 5-4.

Relación de la norma de calidad primaria MP 2,5 con la norma de calidad primaria de MP 10

Tabla 5-2 Costo y Beneficio total de cumplimiento de la norma de MP_{2,5}, versus la concentración promedio nacional de MP_{2,5}, para el año 2012. (Millones de US\$)

Norma Anual MP _{2,5} (ug/m3)	Conc. MP _{2,5} Nacional (ug/m3)	Costo (MUSD)	Beneficio (MUSD)	Costo Marginal (MUSD/(ug/m3))	Beneficio Marginal (MUSD/(ug/m3))
25,0	22,1	133	2.294		
22,5	20,3	349	3.336	119	574
20,0	18,4	757	4.403	220	574
17,5	16,4	1.453	5.583	344	583
15,0	14,3	2.535	6.813	515	586
12,5	12,1	4.121	8.061	744	586
10,0	9,9	6.329	9.397	966	584

Fuente: Elaboración propia

Nota: Los beneficios mostrados son calculados considerando un escenario alto de beneficios.
1US\$=517 CLP\$.

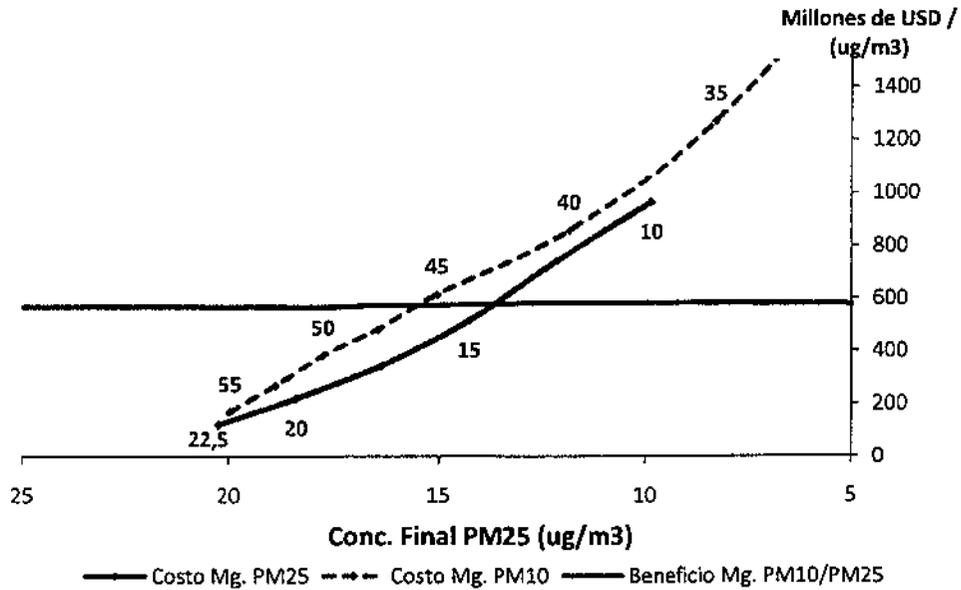
Tabla 5-3 Costo y Beneficio total de cumplimiento de la norma de MP₁₀, versus la concentración promedio nacional de MP_{2,5}, para el año 2012. (Millones de US\$)

Norma Anual MP ₁₀ (ug/m3)	Conc. MP _{2,5} Nacional (ug/m3)	Costo (MUSD)	Beneficio (MUSD)	Costo Marginal (MUSD/(ug/m3))	Beneficio Marginal (MUSD/(ug/m3))
Solo diaria	25,9	4	117		
70	25,7	4	225	2	568
60	22,1	98	2.263	26	568
50	17,7	1.108	4.738	232	568
45	15,0	2.604	6.297	551	574
40	11,8	5.342	8.156	859	583
35	8,3	9.884	10.241	1.269	583
30	4,7	16.845	12.319	1.941	579
25	1,3	26.894	14.235	3.019	576

Fuente: Elaboración propia

Nota: Los beneficios mostrados son calculados considerando un escenario alto de beneficios.
1US\$=517 CLP\$.

Figura 5-4 Costo y Beneficio Marginal de cumplimiento de la norma de MP10 y MP2,5, versus la concentración promedio nacional de MP2,5, para el año 2012. (Millones de US\$)



Fuente: Elaboración propia

El caso base, que es lograr la norma de MP de 50 ug/m3, tiene un costo anual (en 2012) de 1.108 MUSD, y resulta en una concentración promedio (ponderada por población) de MP_{2,5} igual 17.7 ug/m3. Si se analiza la norma de MP_{2,5} sola (sin la norma de MP10 anual), se ve que lograr la norma de MP_{2,5} de 20 ug/m3 resulta en un costo de 757 MUSD, y resulta en una concentración promedio de MP_{2,5} igual 18,4 ug/m3. En cambio, la norma de MP_{2,5} al nivel propuesto de 25 ug/m3 resulta en un costo bajo de solo 133 MUSD, pero en una concentración promedio nacional de 22,1 ug/m3.

Casos Evitados.

La siguiente tabla presenta el número de casos evitados para las alternativas en evaluación:

Relación de la norma de calidad primaria MP 2,5 con la norma de calidad primaria de MP 10

Tabla 5-4: Casos evitados totales en el primer periodo de implementación (2012-2021), para diferentes escenarios de normas de MP2,5 y MP10.

Valor Norma PM2.5	Valor Norma PM10	Zona	MP	AH	DLP	DRA
Sin Norma	50 ug/m ³	Norte	77	169	32.700	54.100
		Centro	483	716	181.000	300.000
		Gran Santiago	29.400	45.400	12.200.000	20.200.000
		Sur	868	1.650	292.000	483.000
		Total	30.800	47.900	12.700.000	21.100.000
25 ug/m ³	50 ug/m ³	Norte	77	169	32.700	54.100
		Centro	483	716	181.000	300.000
		Gran Santiago	29.400	45.400	12.200.000	20.200.000
		Sur	2.330	4.670	805.000	1.330.000
		Total	32.300	51.000	13.200.000	21.900.000
	Sin Norma	Norte	0	0	0	0
		Centro	361	535	135.000	224.000
		Gran Santiago	12.200	18.900	5.100.000	8.430.000
		Sur	2.320	4.660	803.000	1.330.000
		Total	14.900	24.100	6.040.000	9.980.000
20 ug/m ³	50 ug/m ³	Norte	140	292	54.500	90.200
		Centro	782	1.190	290.000	480.000
		Gran Santiago	29.400	45.400	12.200.000	20.200.000
		Sur	6.410	12.800	2.260.000	3.730.000
		Total	36.700	59.700	14.800.000	24.500.000
	Sin Norma	Norte	90	176	31.800	52.600
		Centro	782	1.190	290.000	480.000
		Gran Santiago	21.400	33.100	8.900.000	14.700.000
		Sur	6.410	12.800	2.260.000	3.730.000
		Total	28.700	47.300	11.500.000	19.000.000

Fuente: Elaboración Propia

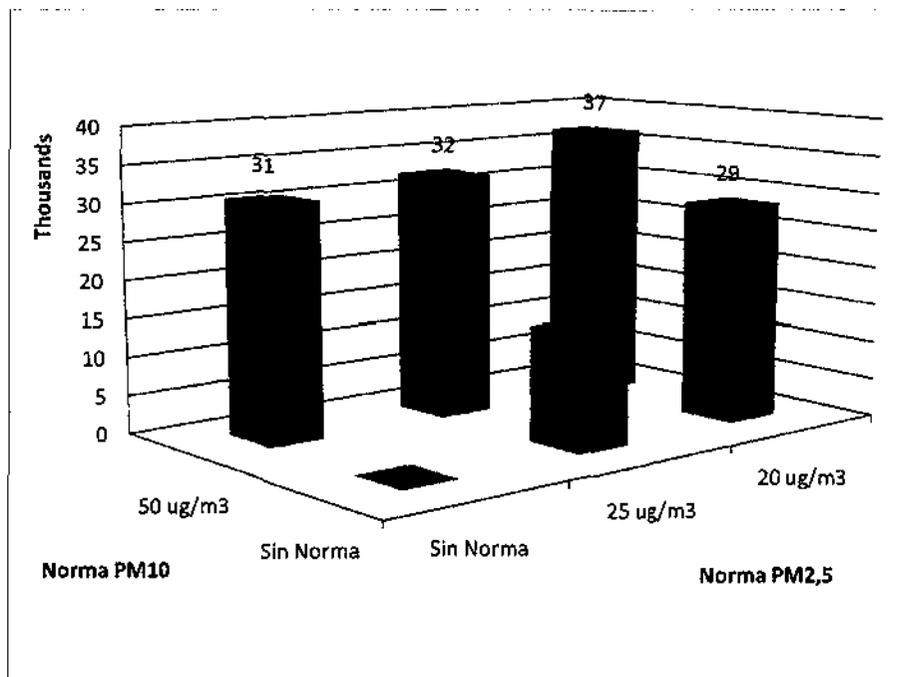
Nota: Valores con 3 cifras significativas

Tal como evidencia la tabla anterior la norma de MP2,5 de 25 ug/m³ no implica un aumento significativo de los casos evitados, esto se debe a que la norma de MP10 incide en los niveles de MP2,5. Para el caso de 20 ug/m³ al ser una norma más estricta los casos evitados aumentan, pero no de forma importante.

Distinta es la situación en que se deroga la norma de MP10 ya que los casos evitados bajan fuertemente, sobre todo para el caso de la norma MP2,5 de 25 ug/m³.

La siguiente figura también representa lo expuesto anteriormente pero en este caso particular muestra los casos evitados en mortalidad a largo plazo según las diferentes alternativas de evaluación.

Figura 5-5 Casos evitados de Mortalidad a Largo Plazo para el periodo 2012-2021



Fuente: Elaboración propia

5.1 Estrategias a seguir para derogar la Norma de MP 10

Es importante contar con el conocimiento adecuado para tomar la decisión sobre mantener o no la norma anual de MP10. En primer lugar se recomienda recolectar información de los estudios epidemiológicos disponibles, de la experiencia internacional con respecto a cambios de norma que se hayan llevado a cabo.

Se recomienda asimismo la realización de una elicitación de expertos para conocer de mejor manera la opinión de la comunidad científica de Chile y el

mundo en cuanto a los efectos del MP 2,5 a la salud de la población en el corto y largo plazo y sobre la continuidad o derogación de la norma anual de MP10. Para esto, es necesario realizar una encuesta específica para el caso nacional, considerando las características socioeconómicas y demográficas, entre otras. En DICTUC (2010) se muestra un borrador de encuesta tipo (ver anexo 8.8), siguiendo la experiencia de Roman, Walker et al. (2008), que debe ser necesariamente desarrollada en formato cara a cara y por un equipo conformado por un experto en cuantificación de los efectos en salud del material particulado y por un encuestador capacitado en elicitación de expertos. En el anexo XX se presenta la lista de expertos nacionales e internacionales a los cuales DICTUC (2010) recomienda realizar la encuesta.

5.1.1 Materias que requieren de un análisis más profundo

DICTUC (2010) propone además la realización de una serie de estudios que serían de gran ayuda al momento de tomar decisiones de control y gestión del material particulado. La Tabla 5-5 presenta los vacíos de información existentes en la actualidad y los estudios asociados para remediar cada situación.

Tabla 5-5 Gaps de información y estudios recomendados

Área	Información faltante	Estudios requeridos
Riesgo	Relación Concentración-respuesta locales del efecto del material particulado en diferentes fracciones en la salud (de corto y largo plazo) y del efecto de cada uno de sus componentes elementales	Estudios epidemiológicos de series de tiempo, case crossover y de cohorte en Santiago y en Regiones Analizar en detalle efectos distributivos de la exposición a material particulado según nivel socioeconómico
	Fracción a controlar y niveles	Estudios locales de riesgo anual de MP10
Composición del MP	Caracterización de componentes	Estudios de composición elemental a nivel de cuencas atmosféricas

Fuente: DICTUC (2010)

6 CONCLUSIONES

Este estudio presenta la evaluación social de la aplicación de una norma para MP_{2,5} en la país, 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: en primer lugar, 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. En segundo lugar se evaluaron los costos y beneficios que tendría la introducción de una norma de MP_{2,5} en el país para diferentes niveles y distintos plazos de cumplimiento. En tercer lugar, se evaluó el impacto que generan las situaciones de episodios críticos, evaluando el número esperado de episodios de diferente tipo, y los beneficios y costos que estos acarrearán. Finalmente, se evaluó la conveniencia de mantener o derogar la actual norma anual de MP₁₀.

La evidencia científica ha mostrado que la exposición al material particulado 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 (MP_{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)

Adicionalmente, la evidencia científica ha demostrado que no se puede proponer niveles de contaminación atmosférica que ofrezcan protección completa contra los efectos perjudiciales del material particulado MP₁₀ y el material particulado fino MP_{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)

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 pretendiendo lograr niveles de exposición de la población 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 el valor límite propuesto para la norma anual de $\text{MP}_{2.5}$. La implementación de la norma de $\text{MP}_{2.5}$ propuesta produce beneficios sociales netos positivos en todos los escenarios considerados. 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 son tan marcadas.

El análisis considera cuantitativamente la incertidumbre cuando ha sido posible. Aún así, en cuanto a los resultados finales, pueden ser considerados conservadores, con una tendencia a la subestimando beneficios y sobreestimación de costos.

Con respecto a costos, hay que mencionar que estos generalmente han sido sobreestimados, debido a las siguientes razones:

- a) Los costos de control de emisiones podrían disminuir más de un 1% anual como fue considerado en el análisis, debido a la creciente presión internacional para reducir emisiones atmosféricas de todo tipo.
- b) La renovación natural del parque de vehículos motorizados no fue considerado en el estudio. Las fuentes móviles son una fuente

crecientemente importante de emisiones, por lo que este efecto 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 subestimados, por las siguientes razones:

- a) En este análisis no se consideró la disminución de emisiones de precursores de ozono. Muchos de los precursores de MP2,5 secundario son también precursores de ozono (NO_x, COV, CO), por lo tanto la reducción de estos precursores tiene como efecto una disminución de los niveles de O₃, que generan beneficios adicionales. Estos beneficios no han sido considerados.
- b) 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 MP2,5, 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)
- c) En este período puede ocurrir que nuevos efectos de la contaminación sobre la salud sean descubiertos, situación que ha ocurrido en los últimos treinta años en los que se ha estado investigando el problema. Independiente de lo anterior, para efectos de evaluación, se han considerado los impactos descritos anteriormente para todo el período analizado ante la imposibilidad de poder predecir el comportamiento del

avance del conocimiento en este campo. Con esta decisión se introduce un sesgo en la evaluación que tiende a subestimar los beneficios.

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 MP_{2,5} es más alto que el de la fracción gruesa.

La reducción de concentraciones que se estima requiere la norma propuesta para MP_{2,5}, logra reducir en 26.000 casos la mortalidad prematura y aumenta en aproximadamente 11 meses la esperanza de vida de la población respecto de la situación base.

Desde un punto de vista económico, los beneficios netos de normar MP_{2,5} exceden, según este análisis, en MM US\$7.100 los beneficios netos de continuar con la situación actual, en la que la norma de emisión para MP₁₀ estaría vigente.

Según el análisis de la norma diaria de PM_{2,5} los resultados mostraron que para un EBA los beneficios sociales de las medidas analizadas a nivel país son positivos en términos agregados (considerando la aplicación de las medidas conjuntamente) en donde la medida de prohibición de uso de estufas a leña posee beneficios netos altamente positivos para los tres episodios críticos evaluados con una alta razón B/C. La medida paralización de fuentes fijas solo posee un beneficio neto positivo en preemergencia mientras que restricción vehicular posee beneficios netos cercanos a cero tanto en preemergencia como en emergencia.

Para un EBB los beneficios sociales son negativos en términos agregados tanto para preemergencia como emergencia mientras que para alerta estos son positivos debido a que solo esta activa la medida de prohibición de estufas a

leña la cual tiene beneficios netos positivos para los tres episodios críticos evaluados. La medida paralización de fuentes fijas aporta significativamente a los beneficios netos negativos en preemergencia y emergencia con una baja razón B/C.

A nivel de ciudad analizada, la aplicación de las medidas en episodios críticos resulta con beneficios netos positivos en las ciudades del Gran Santiago y Gran Temuco tanto para un EBA como para un EBB. Para Gran Concepción en un EBA los beneficios netos resultan positivos alcanzando los 3,1 millones de USD, sin embargo en un EBB el beneficio neto es negativo alcanzando 2 millones de USD. Para ambos escenarios, es interesante destacar la medida de paralización de fuentes fijas la cual aporta negativamente al beneficio neto.

Con respecto a la derogación de la norma de MP₁₀ a nivel nacional, esta no es recomendable si la norma de MP_{2,5} anual se establece en el nivel propuesto de 25 ug/m³. Debido a la presencia de la fracción gruesa del material particulado, de difícil control, el cumplimiento de la norma de MP₁₀ actual resulta en una concentración promedio nacional (ponderada por población) de aproximadamente 18 ug/m³ de MP_{2,5}. En esta situación, derogarla para establecer una norma anual de 25 ug/m³ sería un retroceso más que un progreso. La ventaja de la norma de MP_{2,5} es que centra los esfuerzos de control en la fracción del material particulado más agresiva para la salud. Esto se traduce en que se logran beneficios similares en cuanto a salud a un costo mucho menor (tal como muestran las tablas 5-2 y 5-3, el costo para lograr una concentración nacional promedio anual de MP_{2,5} de aproximadamente 18 ug/m³ controlando el MP_{2,5} puede ser solo un 70% del costo de lograr la misma concentración, pero a través del control de MP₁₀). Pero al pasar de una norma a otra se debe resguardar que el nivel final de exposición de la población sea similar, o que por lo menos, no se incremente. Nuestro análisis muestra que pasar de la actual norma anual de MP₁₀ de 50 ug/m³ a solo una norma de

MP2,5 de 25 ug/m³ aumentaría la exposición anual de la población al MP2,5 desde un nivel promedio de 17,7 a 22,1 ug/m³. Los casos de mortalidad prematura evitados por el cumplimiento de cada norma en los primeros 10 años de aplicación se reducirían de aproximadamente 31 mil a solo 15 mil. Aunque los costos de cumplimiento se reducirían en una proporción mayor, el análisis muestra que para los niveles de 25 y 20 ug/m³, los beneficios marginales de reducción de MP2,5 son mayores que los costos marginales, justificando incluso una concentración final de MP2.5 inferior a 15 ug/m³. En estas circunstancias, no es recomendable la sustitución de la norma de MP10 actual por la norma de MP2,5 en el nivel de 25 ug/m³. Solo sería recomendable derogar la norma de MP10 si la norma de MP2,5 se estableciera en el nivel 20 ug/m³. De otro modo, se estaría empeorando la situación de protección de salud de la población que la norma debe resguardar.

7 REFERENCIAS

Ambiente Consultores (2007). Análisis técnico-económico de la aplicación de una norma de emisión para artefactos de uso residencial que combustión con leña y otros combustibles de biomasa.

Anderson, H. R., S. A. Bremner, et al. (2001). "Particulate matter and daily mortality and hospital admissions in the west midlands conurbation of the United Kingdom: associations with fine and coarse particles, black smoke and sulphate." Occupational and Environmental Medicine 58: 504-510.

Brunekreef, B. and B. Forsberg (2005). "Epidemiological evidence of effects of coarse airborne particles on health." European Respiratory 26: 309-318.

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

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." Air & Waste Management Association 50: 1287-1298.

CONAMA (2008). Plan de Prevención y Descontaminación de la Región Metropolitana, Conama.

CONAMA (2008). Plan operacional para la gestión de episodios críticos de contaminación atmosférica por material particulado respirable (PM10) en la Región Metropolitana.

CONAMA (2010). Plan operacional para la gestión de episodios críticos de contaminación atmosférica por material particulado respirable (PM10) en la Región Metropolitana.

CONAMA RM (2008). Anteproyecto de revisión, reformulación y actualización del Plan de Prevención y de Descontaminación Atmosférica para la Región Metropolitana (PPDA).

Chen, L. H., S. F. Knutsen, et al. (2005). "The Association between Fatal Coronary Heart Disease and Ambient Particulate Air Pollution: Are Females at Greater Risk?" Environmental Health Perspectives 113(12): 1723-1729.

DICTUC (2001). Antecedentes para la realización del análisis costo beneficio del plan de descontaminación de la Región Metropolitana - AGIES RM. Santiago, Chile, Informe preparado para CONAMA RM.

DICTUC (2001). Generación de Instrumentos de Gestión Ambiental para la Actualización del Plan de Descontaminación Atmosférica para la Región Metropolitana de Santiago al Año 2000. Parte I. Estimación de los Beneficios Sociales de la Reducción de Emisiones y Concentraciones de Contaminantes Atmosféricos en la Región Metropolitana. Parte II. Análisis Económico de Medidas Seleccionadas. Santiago, P. Universidad Católica de Chile.

DICTUC (2008). Actualización del inventario de emisiones atmosféricas en las comunas de Temuco y Padre Las Casas

DICTUC (2008). Análisis y Evaluación del Impacto Económico y Social del Plan de Descontaminación de la Región Metropolitana. Santiago, Chile.

DICTUC (2009). Antecedentes para el Análisis General de Impacto Económico y Social del Anteproyecto de la Norma de Calidad Primaria para PM2.5 (AGIES). Santiago, Chile.

DICTUC (2010). Actualización de los Antecedentes para el AGIES de la nueva norma de material particulado fino. Reporte encargado por CONAMA Nacional.

DICTUC (2010). Elementos para definir una Estrategia Nacional en la Gestión y Regulación de los Contaminantes Material Particulado Respirable (MP10) y Material Particulado Fino (MP2.5), Estudio preparado para CONAMA RM.

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.

Englert, N. (2004). "Fine particles and human health - a review of epidemiological studies." Toxicology Letters 149: 235-242.

EPA (2009). Integrated Science Assessment for Particulate Matter - Second External Review Draft. Washington DC, US Government.

Fairley, D. (1999). "Daily Mortality and Air Pollution in Santa Clara County, California: 1989-1996." Environmental Health Perspectives 107(8).

Fairley, D. (2003). Mortality and Air Pollution for Santa Clara County, California, 1989-1996. Health Effects Institute.

GAMMA Ingenieros S.A. (2007). "Diseño y evaluación de las nuevas medidas para fuentes fijas contenidas en el PPDA línea de trabajo n° 4: Análisis del mercado de equipos de calefacción residencial a Biomasa Actualizado al año 2006."

Health Effects Institute (2003). Revised Analyses of Time-Series Studies of Air Pollution and Health. Boston MA., Health Effects Institute.

INE (2008). Parque de Vehículos en Circulación.

Ito, K. (2003). Associations of Particulate Matter Components with Daily Mortality and Morbidity in Detroit, Michigan. Health Effects Institute.

Klemm, R. J. and R. M. Mason, Jr. (2000). "Aerosol Research and Inhalation Epidemiological Study (ARIES): Air Quality and Daily Mortality Statistical Modeling— Interim Results." Air & Waste Management Association 50: 1433-1439.

Künzli, N., S. Medina, et al. (2001). "Assessment of Deaths Attributable to Air Pollution: Should We Use Risk Estimates based on Time Series or on Cohort Studies?" American Journal of Epidemiology 153(11): 1050-1055.

Lipfert, F. W., S. C. Morris, et al. (2000). "Daily Mortality in the Philadelphia Metropolitan Area and Size-Classified Particulate Matter." Air & Waste Management Association 50: 1501-1513.

Lipfert, F. W., R. E. Wyzga, et al. (2005). "Traffic density as a surrogate measure if environmental exposures in studies of air pollution health effects: Long-term mortality in a cohort of US veterans." Atmospheric Environment 40(1): 154-169.

Mar, T. F., G. A. Norris, et al. (2003). "Associations between Air Pollution and Mortality in Phoenix, 1995-1997." Environmental Health Perspectives 108(4): 347-353.

MIDEPLAN (2010). Precios Sociales para la Evaluacion Social de Proyectos.

Ostro, B. D., R. Broadwin, et al. (2000). "Coarse and fine particles and daily mortality in the Coachella Valley, California: a follow-up study." Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology 10: 412-419.

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): 1132-1141.

Pope III, C. A., R. T. Burnet, et al. (2002). "Lung Cancer, Cardiopulmonary Mortality, and Long-term Exposure to Fine Particulate Air Pollution." American Medical Association 287(9): 1132-1141.

Roman, H. A., K. D. Walker, et al. (2008). "Expert Judgment Assessment of the Mortality Impact of Changes in Ambient Fine Particulate Matter in the U.S." Environmental Science & Technology 42(7): 2268-2274.

SECTRA (2004). "Actualización de Encuestas Origen Destino de Viajes, Talca, IV Etapa."

SECTRA (2008). "Actualización de Encuestas Origen Destino de Viajes, RM, III Etapa."

SEGPRES (2004). DS N°58/1998 Reformula y actualiza plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica para la Región Metropolitana (PPDA). Santiago, Chile.

SEREMI de Salud (2008). Base de datos de emisiones de fuentes fijas a nivel unitario, comunal, regional y nacional. Proporcionada por Gabriel Silva CONAMA con fecha 01/10/2008.

Universidad de la Frontera (2009). Diseño de un programa de recambio de artefactos existentes que combustionan leña por tecnología menos contaminantes, en las comunas de Temuco y Padre Las Casas.

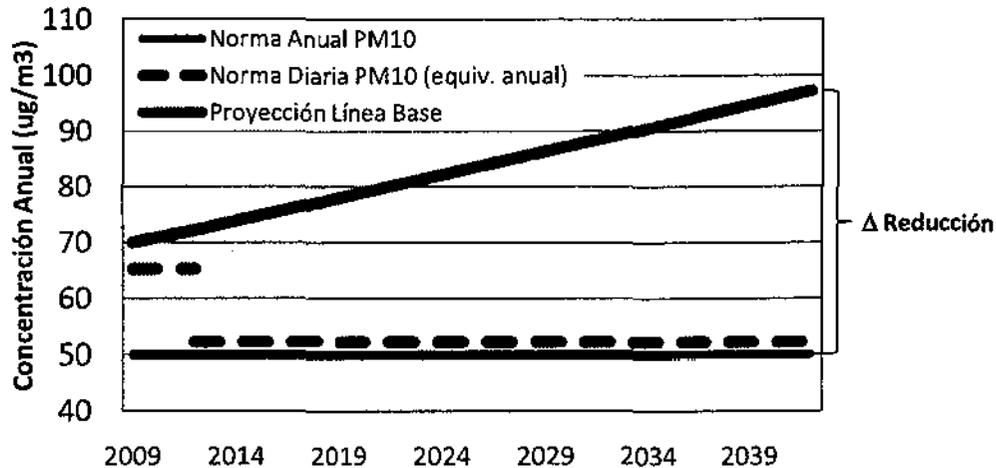
Villena, M., M. Villena, et al. (2007). Análisis General de Impacto Económico y Social del Rediseño del Plan Operacional para Enfrentar Episodios Críticos de Contaminación Atmosférica por Material Particulado Respirable (PM10) en la Región Metropolitana. Estudio Realizado para CONAMA RM., SCL Econometrics.

Villeneuve, P. J., R. T. Burnett, et al. (2003). "A time-series study of air pollution, socioeconomic status, and mortality in Vancouver, Canada." Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology 13: 427-435.

Relación de la norma de calidad primaria MP 2,5 con la norma de calidad primaria de MP 10

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.

Reducción de concentraciones requerida cuando la norma anual es activa



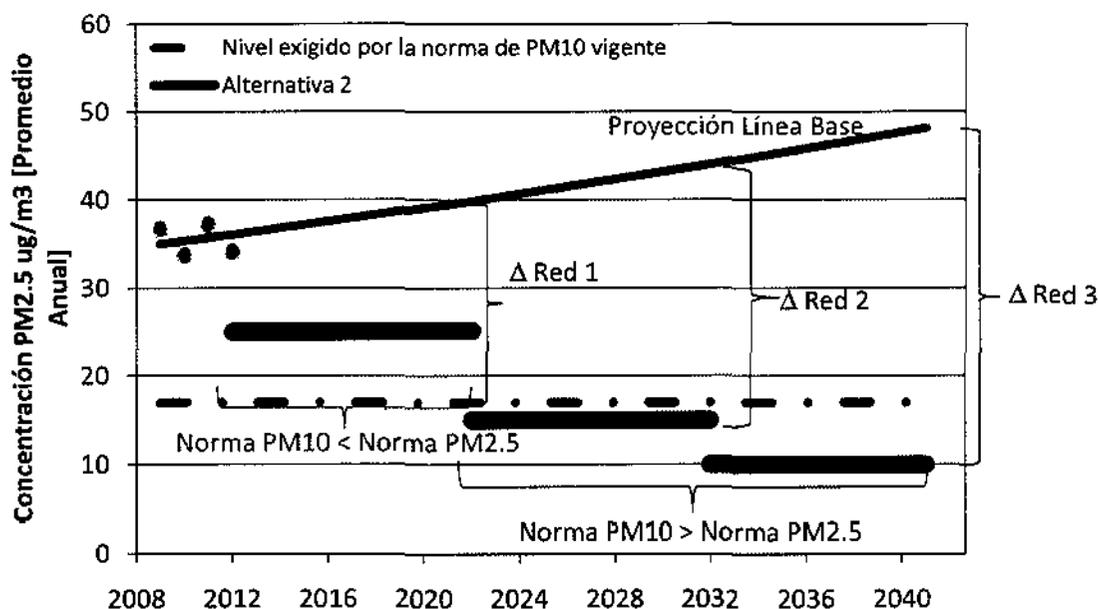
Fuente: (DICTUC 2009)

Caso con Proyecto: Norma de MP2,5

En este caso, tanto la norma de MP₁₀ como la de MP_{2,5} 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 MP₂₅ asociada a la norma de MP₁₀ usando la relación obtenida según el itinerario de reducciones de emisiones a mínimo costo de MP₁₀. Si con esto se cumple la norma de MP_{2,5}, entonces esta norma es inactiva. Por el contrario, si después de cumplir la norma de MP₁₀ aun no se cumple la norma de MP_{2,5}, esta última será la norma activa. Esto ocurrirá principalmente en los últimos periodos, ya que la norma de MP_{2,5} es decreciente en el tiempo. En la siguiente figura se muestra de manera gráfica el esquema utilizado para el caso de la alternativa de norma propuesta.

Relación de la norma de calidad primaria MP 2,5 con la norma de calidad primaria de MP 10

Reducciones de concentraciones requeridas en caso con norma de MP10 y MP_{2,5} simultáneamente.



Fuente: (DICTUC 2009)

En el caso presentado en la figura (que corresponde solo a un ejemplo) se muestra que en el primer periodo, la norma de MP₁₀ es activa (por lo tanto la norma de MP_{2,5} no tiene ningún efecto), mientras que en los periodos 2 y 3 la norma de MP_{2,5} es activa. Este ejemplo es solo ilustrativo.

8.2 Inventarios de emisiones utilizados.

Tabla 8-1 Inventarios de emisiones

		Contaminante (ton/año)									
Ciudad	Sector	CO	CO2	COV	NH3	NOX	PM1025	PM25	PR5	SOX	TOTAL
Región 05-A8	Comercial	-	-	5,082	-	-	-	-	-	-	5,082
	Fugitivas	-	-	-	-	-	-	-	25,176	-	25,176
	Emoviles	1,526	-	617	370	6,210	313	5,621	-	55,848	70,005
	OtrasFF	17,273	-	1,882	10,426	260	281	2,531	-	-	32,653
	Residencial	289	-	8,143	1,042	1,914	34	305	-	-	17,306
Región 05-A8 Total		19,058		15,725	12,042	8,384	629	7,458	25,176	61,755	150,426
Región 06-A8	Comercial	-	-	11,106	-	-	-	-	-	-	11,106
	Fugitivas	-	-	-	-	-	-	-	37,835	-	37,835
	Emoviles	17,975	-	1,480	72	4,999	25	222	-	143	24,913
	Industria	1,532	-	46	63	2,294	136	1,233	-	-	117,431
	OtrasFF	51,715	-	45,429	129,889	4,134	596	5,368	-	-	3,188
Residencial	49,918	-	26,108	699	653	584	5,253	-	-	90	
Región 06-A8 Total		120,141		84,170	130,823	12,081	1,342	12,079	37,835	121,052	319,922
Yacopilla	Comercial	-	-	-	-	1,712	-	-	-	-	1,712
	Fugitivas	-	-	-	-	-	-	-	96	-	96
	Emoviles	167	-	18	2	49	0	2	-	3	241
	Industria	803	-	-	-	16,555	183	1,444	-	-	20,340
	Residencial	20	-	-	-	11	0	3	-	-	34
Yacopilla Total		992		18	22	18,318	185	1,461	96	28,369	49,441
Venenas	Comercial	-	-	30	-	-	0	-	-	-	30
	Fugitivas	-	-	-	-	-	-	-	816	-	816
	Emoviles	732	-	30	-	1,311	3	22	-	3,951	6,034
	Industria	225	-	169	411	2,683	31	477	-	-	36,875
	Residencial	31	-	47	0	0	0	0	-	-	78
Venenas Total		989		282	411	4,005	34	309	816	40,829	47,899

		Contaminante (ton/año)									
Ciudad	Sector	CO	CO2	COV	NH3	NOX	PM1025	PM25	PR5	SOX	TOTAL
Calera	Comercial	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Fugitivas	-	-	-	-	-	-	-	26,757	-	26,757
	Emoviles	4,330	-	164,181	3,433	21	1,097	7	66	-	170,406
	Industria	135	-	24	27	501	217	12,930	-	-	80,216
	Residencial	52	-	2	0	0	0	0	-	-	54
Calera Total		4,741		164,181	3,460	39	1,314	12,937	26,757	80,284	391,322
Gran Concepcion	Comercial	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Fugitivas	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Emoviles	20,295	-	970,560	-	114	5,749	34	326	-	997,124
	Industria	-	-	-	-	425	4,507	907	18,164	-	12,232
	Residencial	44,794	-	10,327	-	345	61,295	11,639	-	-	68,821
Gran Concepcion Total		65,089		970,560	539	10,821	2,239	20,150	12,257	1,091,981	
Gran Santiago	Comercial	-	-	8,192	-	-	-	-	-	-	8,192
	Fugitivas	-	-	-	-	-	-	-	21,519	-	21,519
	Emoviles	206,033	-	6,638,527	20,387	991	38,919	280	2,523	-	6,907,832
	Industria	4,457	-	5,855	192	10,107	91	815	-	-	11,534
	Residencial	9,494	-	19,549	28,722	313	109	977	-	-	39,481
Gran Santiago Total		230,581		6,638,527	106,274	33,947	53,228	580	5,221	21,519	7,102,465
Gran Tambo	Comercial	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Fugitivas	-	-	-	-	-	-	-	5,574	-	5,574
	Emoviles	15,957	-	235,111	1,749	24	3,053	10	94	-	256,093
	Industria	163	-	39	27	44	15	139	-	-	398
	Residencial	55,727	-	32,402	305	1,007	562	5,056	-	-	95,279
Gran Tambo Total		73,088		235,111	34,272	359	4,127	600	5,574	721	339,251
Gran Valparaiso	Comercial	-	-	501	-	-	-	-	-	-	501
	Fugitivas	-	-	-	-	-	-	-	29,640	-	29,640
	Emoviles	15,124	-	2,499	43	4,048	19	170	-	-	22,133
	Industria	42	-	363	6	17	13	116	-	-	560
	Residencial	80	-	4,132	565	478	9	84	-	-	6,830
Gran Valparaiso Total		18,237		7,783	620	4,589	91	817	29,640	1,736	63,512

8.3 Conformación de Material Particulado Secundario.

La metodología que se describe el cálculo de la concentración ambiental en la formación de material particulado secundario, a partir de los estudios de filtros, se describe a continuación:

$$C_{ij} = CT_i * F_{ij}$$

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 [%]²⁸

i: $\text{MP}_{2,5}$, MP_{10}

j: Amonio, Sulfato, Nitrato, Cloruro, C Elemental, C Orgánico, Polvo Natural, Polvo Antropogénico, Otros, Background.

Fue necesario distinguir entre los aportes de los contaminantes primarios a las distintas fracciones del MP, es decir, al material particulado fino o $\text{MP}_{2,5}$ y al material particulado grueso, denominado aquí MP_g , correspondiente al material particulado entre 10 y 2,5 micrones, para lo cual se supusieron las relaciones que se presentan en la Tabla 8-2.

Estas relaciones suponen que todo el $\text{MP}_{2,5}$ emitido por las fuentes genera un aporte a las concentraciones ambientales sólo como $\text{MP}_{2,5}$, así como todos los contaminantes secundarios formados a partir de gases (NH_3 , SO_2 y NO_x). Por

²⁸ El análisis de filtros sólo se encuentra disponible para Santiago, para las demás ciudades se extrapoló a partir de esta.

Relación de la norma de calidad primaria MP 2,5 con la norma de calidad primaria de MP 10

su parte, solamente la emisión directa de MPg genera un aporte a la concentración de MPg.

Tabla 8-2 Relaciones Consideradas entre los Contaminantes Primarios y Secundarios

Contaminante Emitido por las Fuentes	Componente Correspondiente en Filtro	Aporta Como Fracción
NH ₃	Amonio	Fina (MP _{2,5})
SO ₂	Sulfato	Fina (MP _{2,5})
NO _x	Nitrato	Fina (MP _{2,5})
MP _{2,5}	Carbono elemental + Carbono orgánico	Fina (MP _{2,5})
MPg	Polvo Antropogénico	Gruesa (MPg)

Fuente: (DICTUC 2009)

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, SO₂ y NH₃ principalmente se forma material particulado fino.

Se ha identificado una fracción de componente elemental asociado a background. Se entendió 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.

8.4 Asignación de Medidas por Fuente Emisora

En las siguientes tablas se realizó un resumen de las medidas más importantes²⁹ y fuente emisora a la cual es aplicada.

Tabla 8-3 Medidas aplicadas en el AGIES del PPDA de la RM, para Fuentes Móviles³⁰

Nº	Nombre medida	Fuente a la que se aplica	Red. Promedio ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
1	Incentivos Camiones en Flota	FM: Camiones	0.19
2	Norma ASM	FM: Vehículos livianos	0.12
3	Maquinaria Fuera de Ruta	FM: fuera de ruta	0.05
4	Restricción Vehicular Gasolina	FM: Vehículos livianos	0.01
5	Buses Nueva Norma EIV from all	FM: Buses	0.01
6	Calidad Combustible Diesel	Todo FM	0.00
7	Calidad Combustible Gasolina	Todo FM	0.00
8	Nueva Norma Gasolina	FM: Vehículos livianos	0.00
9	Restricción Vehicular Diesel	FM: Vehículos livianos	0.00

Fuente: (DICTUC 2009)

²⁹ 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

³⁰ La Reducción Promedio representa el promedio de reducciones de $\text{PM}_{2.5}$ para las ciudades donde esa medida fue aplicada. Además, los valores para Red. Promedio = $0.00 \mu\text{g}/\text{m}^3$ representa una reducción nula de concentraciones para el número de cifras significativas considerada, distinto a un valor de $0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 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 8-4 Medida Aplicada por Fuentes Fijas.³¹

N°	Nombre medida	Fuentes a la que se aplica	Referencia	Red. Promedio (µg/m ³)
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 MP Controls	FF industriales: procesos minerales y metalúrgicos	AirControlNet	0.62
7	Norma SO ₂ (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 MP Controls	FF industriales: procesos minerales y metalúrgicos	AirControlNet	0.53
11	Low NOx 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 NOx 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 NOX	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
23	Selective Catalytic Reduction (SCR)	FF industriales: procesos minerales y metalúrgico /residenciales: combustión externa	AirControlNet	0.06

Fuente: (DICTUC 2009)

³¹ La Reducción Promedio representa el promedio de reducciones de PM_{2.5} para las ciudades donde esa medida fue aplicada. Además, los valores para Red. Promedio = 0.00 µg/m³ representa una reducción nula de concentraciones para el número de cifras significativas considerada, distinto a un valor de 0 µg/m³ 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.

Relación de la norma de calidad primaria MP 2,5 con la norma de calidad primaria de MP 10

Tabla 8-5 Medidas aplicadas para Fuentes Fugitivas

Nº	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: (DICTUC 2009)

8.5 Asignación de Curvas de Costo por Ciudad.

Tabla 8-6 Curvas de costo asignadas

Ciudad	Calama	Tocopilla	V Región	VI Región	Gran Concepción	Gran Temuco	Gran Santiago
Arica							
Alto Hospicio							
Pozo Almonte							
Iquique							
Antofagasta							
Calama							
María Elena							
Mejillones							
Sierra Gorda							
Tocopilla							
Caldera							
Chañaral							
Copiapó							
Huasco							
La Serena-Coquimbo							
Ovalle							
La Calera							
Cabildo							
Quintero							
Gran Valparaíso							
Putendo							
Litilay							
Puchuncaví							
Quillota							
Catemu							
Los Andes							
San Antonio							
San Felipe							
Gran Santiago							
Rancagua							
Requinoa							
Rengo							
San Fernando							
San Vicente							
Cauquenes							
Constitución							
Curicó							
Linares							
Talca							
Chillán							
Gran Concepción							
Arauco							
Codegua							
Los Angeles							
San Carlos							

Fuente: Actualización DICTUC (2010) a (DICTUC 2009)

Relación de la norma de calidad primaria MP 2,5 con la norma de calidad primaria de MP 10

Tabla 8-7 Curvas de costo asignadas (Continuación)

Ciudad	Calama	Tocopilla	V Región	VI Región	Gran Concepción	Gran Temuco	Gran Santiago
Angol						1	
Nueva Imperial						1	
Gran Temuco						1	
Osorno						1	
Puerto Montt						1	
Valdivia						1	
Coihaique						1	
Punta Arenas						1	

Fuente: Actualización DICTUC (2010) a (DICTUC 2009)

8.6 Cálculo de Emisiones Efectivas y Reducciones por Medida.

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

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

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

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 .

ΔE_i^N : Reducción de emisiones aplicando N medidas para la fuente i .

Con el cálculo de las reducciones (ΔE_i^N (ton/año)) es posible estimar la reducción en concentración anual de $MP_{2,5}$ 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 $MP_{2,5}$.

8.7 Principales resultados AGIES para todas las alternativas evaluadas

Se presentan los resultados de las tablas más importantes de la evaluación económica incorporadas en el documento AGIES Norma de Emisión para Material Particulado Fino MP_{2,5} con los datos para las diferentes alternativas evaluadas.

Tabla 8-8 Alternativas de norma evaluadas ($\mu\text{g}/\text{m}_3$ promedio anual)

Escenario	2012	2022	2032
Base	MP10: Promedio Anual 50 $\mu\text{g}/\text{m}_3$ – Promedio Diario 120 $\mu\text{g}/\text{m}_3$		
Alternativa 1	20	15	10
Alternativa 2	25	15	10
Alternativa 3	25	20	10
Alternativa 4	25	20	15

*Solo para ciudades con información de monitoreo

Fuente: (DICTUC 2009)

Tabla 8-9 Número de Ciudades Declaradas como Zona Saturada por Alternativa Evaluada y Valor Presente de los Costos para Zona Saturada.

Escenario	2012	2022	2032	VP Costos (MM USD)	IC (90%) (MMUSD)	
Base	15	0		4.6	3.6	5.7
Alternativa 1	20	4	3	7.0	5.4	8.6
Alternativa 2	15	9	3	6.1	4.7	7.5
Alternativa 3	15	5	7	5.8	4.5	7.2
Alternativa 4	15	5	4	5.6	4.3	6.9

*Solo para ciudades con información de monitoreo

Fuente: (DICTUC 2009)

Tabla 8-10 Casos Totales Evitados en el Período 2012-2041 (Miles de casos)

Efecto	Norma Base MP ₁₀	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
Mortalidad Prematura	102	161	156	148	127
Admisiones Hospitalarias	62	101	98	92	79
Visitas Sal Emergencia Niños	97	167	161	151	129
Días Laborales Perdidos	697	1.070	1.041	988	854
Días con alguna restricción de actividad	42.313	63.803	62.204	59.133	51.174
Costos (Millones de USD)	11.500	32.300	28.200	22.200	14.900
Costos (Millones de USD)	11.500	32.300	28.200	22.200	14.900

Nota: Los casos para la Norma Base MP₁₀ se calculan con respecto a la situación proyectada. Las alternativas a la Norma de MP_{2,5} son adicionales a la Norma Base MP₁₀, 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: (DICTUC 2009)

Tabla 8-11 Esperanza de Vida por Alternativa de Norma

Norma	2012	2022	2032
Base	6,3	6,3	6,3
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: (DICTUC 2009)

Tabla 8-12 Valor presente de los costos y beneficios por período (percentil 50, Millones de US\$)

Alternativa Norma	Indicador	Período			
		2012-2021	2022-2031	2032-2041	Total
Base	VP Beneficios	22.600	18.600	15.400	56.500
	VP Costos	7.380	3.420	1.600	12.300
Alternativa 1	VP Beneficios	26.800	26.900	30.600	84.300
	VP Costos	10.500	11.200	12.900	34.500
Alternativa 2	VP Beneficios	23.600	26.900	30.600	81.100
	VP Costos	6.100	11.200	12.900	30.200
Alternativa 3	VP Beneficios	23.600	22.200	30.600	76.400
	VP Costos	6.100	4.810	12.900	23.700
Alternativa 4	VP Beneficios	23.600	22.200	22.200	68.000
	VP Costos	6.100	4.810	5.130	15.900

Relación de la norma de calidad primaria MP 2,5 con la norma de calidad primaria de MP 10

Nota: Valor Presente calculado para los distintos períodos, con una tasa de descuento de 6% anual. Tipo Cambio 517 CLP/USD. Valores presentados con dos cifras significativas.
Fuente: (DICTUC 2009)

Tabla 8-13 Costo de Reducción Anual por Periodo de Tiempo (Millones de USD por año)

Alternativa	Período		
	2012-2021	2022-2031	2032-2041
Base	960	430	210
Alternativa 1	1.400	1.500	1.700
Alternativa 2	860	1.500	1.700
Alternativa 3	860	640	1.700
Alternativa 4	860	640	750

Nota: Tipo Cambio 517 CLP/USD. Valores con dos cifras significativas.
Fuente: (DICTUC 2009)

Tabla 8-14 VP Beneficio Neto de la norma (Millones de US\$)

Alternativa	Per 50	IC (90%)
Base	44.200	(2.630 - 86.000)
Alternativa 1	49.800	-(21.600 - 120.000)
Alternativa 2	50.900	-(15.500 - 116.000)
Alternativa 3	52.700	-(8.140 - 112.000)
Alternativa 4	52.100	(1.270 - 103.000)

Nota: Valor Presente calculado con una tasa de descuento de 6% anual. Tipo Cambio 517 CLP/USD.
Valores con tres cifras significativas.
Fuente: (DICTUC 2009)

Tabla 8-15 VP de los Beneficios y Costos distribuidos por agente económico (Millones de US\$)

Ítem	Base	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
Beneficios					
Privados	2.260	3.370	3.240	3.050	2.720
Estado	6.780	10.100	9.720	9.160	8.160
Población	47.400	70.800	68.100	64.100	57.100
Total	56.500	84.300	81.100	76.400	68.000
Costos					
Privados	3.170	13.400	10.300	9.520	6.970
Estado	2.580	9.260	8.190	6.750	4.470
Población	6.560	11.900	11.700	7.490	4.520
Total	12.300	34.500	30.200	23.700	15.900

Nota: Valor Presente calculado con una tasa de descuento de 6% anual. Tipo Cambio 517 CLP/USD. Valores con tres cifras significativas.

Fuente: (DICTUC 2009), considerando la distribución propuesta por DICTUC (2001).

Tabla 8-16 Distribución de costos por alternativa de norma y sector

Sector	Base	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
F-fugitivas	8%	9%	10%	14%	7%
F-móviles	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%

Fuente: (DICTUC 2009)

Tabla 8-17 Valor Presente de Costos Distribuidos por Sector Emisor (Millones de US\$)

Sector	Base	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
F-fugitivas	947	2.980	3.080	3.390	1.130
F-móviles	1.490	3.260	3.330	2.920	2.060
Industrial	2.380	11.700	8.500	7.970	5.870
Otros	1.620	6.270	5.090	3.350	3.330
Residencial	5.860	10.400	10.100	6.120	3.550
Comercial	0	9	9	2	2
Saturadas	5	7	7	6	6
Monitoreo	4	4	4	4	4
Total	12.300	34.500	30.200	23.700	15.900

Nota: Valor Presente calculado con una tasa de descuento de 6% anual. Tipo Cambio 517 CLP/USD. Valores con tres cifras significativas.

Fuente: (DICTUC 2009)

8.8 Elicitación de expertos

Existe un Protocolo previo a la realización de la encuesta que debe ser respetado con el objeto de mantener la seriedad y compromiso para con los expertos a encuestar y de obtener la información de la forma más clara posible. Además, el protocolo debe ser el mismo para cada experto para no crear ningún tipo de influencia sobre alguno de ellos.

8.8.1 Protocolo de Elicitación

En primer lugar se debe definir a quién se le realizará la encuesta. Para esto, se creó una lista presentada en la Tabla 8-18, la cual incluye a connotados profesionales nacionales e internacionales expertos en contaminación atmosférica y sus efectos en la salud humana.

A cada uno de los expertos se le realiza la invitación a participar del estudio a través de una carta formal. Luego de aceptar la invitación, se le hace entrega del material bibliográfico que incluye una vasta lista de estudios realizados sobre el tema, con el objetivo de crear un marco teórico similar para todos los expertos. A continuación se presenta la lista de estudios entregada a cada experto, junto con la localidad a la que hace referencia cada estudio.

Tabla 8-18 Lista de estudios entregados a expertos

Estudio	Localidad
(Fairley 1999)	Santa Clara County, California, EEUU
(Castillejos, Borja-Aburto et al. 2000)	Ciudad de México, México
(Cifuentes, Vega et al. 2000)	Santiago, Chile
(Klemm and Mason 2000)	Atlanta, EEUU
(Lipfert, Morris et al. 2000)	Philadelphia, EEUU
(Ostro, Broadwin et al. 2000)	Coachella Valley, California, EEUU
(Anderson, Bremner et al. 2001)	West Midlands, Reino Unido

Estudio	Localidad
(Künzli, Medina et al. 2001)	No aplica
(Pope III, Burnet et al. 2002)	EEUU
(Fairley 2003) in (Health Effects Institute 2003)	Santa Clara County, California, EEUU
(Ito 2003) in (Health Effects Institute 2003)	Detroit, Michigan, EEUU
(Mar, Norris et al. 2003)	Phoenix, EEUU
(Villeneuve, Burnett et al. 2003)	Vancouver, Canada
(Englert 2004)	No aplica
(Brunekreef and Forsberg 2005)	No aplica
(Chen, Knutsen et al. 2005)	EEUU
(Lipfert, Wyzga et al. 2005)	EEUU
(Roman, Walker et al. 2008)	No aplica

Fuente: Elaboración propia

Es de suma importancia que la encuesta sea realizada por dos personas altamente calificadas en los efectos a la salud provocados por la contaminación atmosférica (y específicamente por el MP grueso) y en la elicitación de expertos.

La encuesta en sí consta de 12 partes cuidadosamente dispuestas de manera de facilitar la respuesta del experto. Cada una de estas etapas recopila información valiosa sobre el juicio de los expertos y son descritas a continuación.

8.8.1.1 Introducción

Muestra los objetivos de la encuesta, así como la metodología que se aplicará y los términos de confidencialidad. Con respecto a estos últimos, se explica que a cada experto se le asigna una letra al azar y que en ningún caso se difundirá el juicio del experto junto a su identidad.

8.8.1.2 Línea Base

En esta etapa, cada experto puede conocer, a través de gráficos, la situación nacional con respecto a:

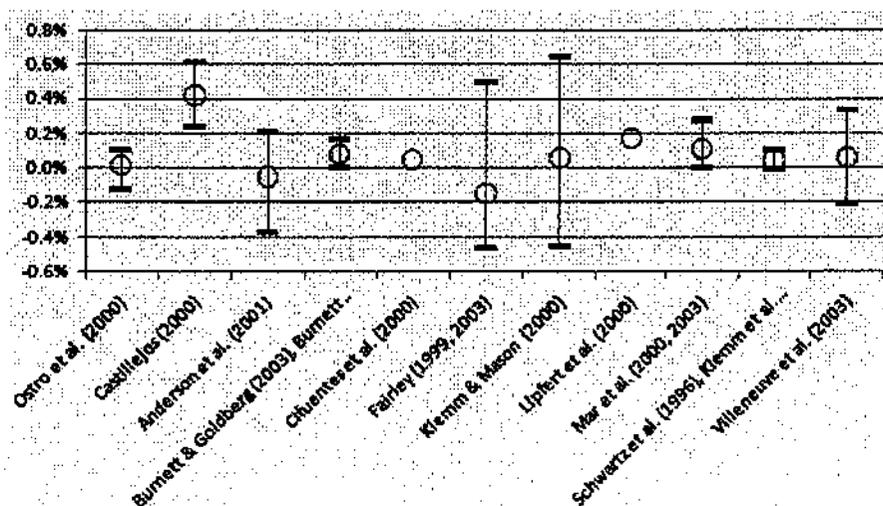
- Niveles de concentración de MP grueso y MP fino para algunas comunas
- Tasa de mortalidad por cáncer, enfermedades cardiovasculares, respiratorias y externas para adultos mayores, adultos y niños.
- Población por comuna.

Esta información representa las condiciones que cada experto debe suponer al momento de elaborar sus respuestas.

8.8.1.3 Evidencia Científica

Al igual que en la etapa anterior, el objetivo de esta es dar a conocer el contexto, pero esta vez de los estudios existentes que relacionan la contaminación ambiental por MP con mortalidad para corto y largo plazo.

Figura 8-1 Aumento de riesgo de mortalidad por exposición a MP10-2,5



Fuente: Elaboración propia en base a los estudios mostrados

El experto debe responder si conoce o no cada uno de los estudios presentados. Además, tiene la posibilidad de revisar la base de datos original con los detalles de cada estudio o simplemente ver los riesgos asociados a cada uno de ellos (Figura 8-1).

8.8.1.4 Causalidad

El objetivo de esta etapa es conocer la opinión del experto sobre la existencia de una relación causal entre la exposición a MP grueso y mortalidad. Para esto, primero se definen los 5 rangos de causalidad existentes, de mayor a menor grado:

- Existe relación causal
- Es probable la existencia de una relación causal
- Sugerente de la existencia de causalidad
- Inadecuada para inferir causalidad
- Sugerente de la no existencia de causalidad

Luego, el experto debe clasificar la exposición de largo y de corto plazo según los rangos presentados arriba. Posteriormente, debe señalar los estudios en los cuales se basó para concluir la causalidad mencionada y cuál cree que es la evidencia científica necesaria para afirmar la existencia de una relación causal entre la exposición a MP grueso y mortalidad.

Finalmente, se le pide al experto que señale la media, el mínimo y el máximo de un rango que represente la probabilidad de que exista una relación causal entre la exposición a MP grueso y mortalidad, junto con los motivos que lo llevan a tal estimación.

8.8.1.5 Preguntas Cuantitativas

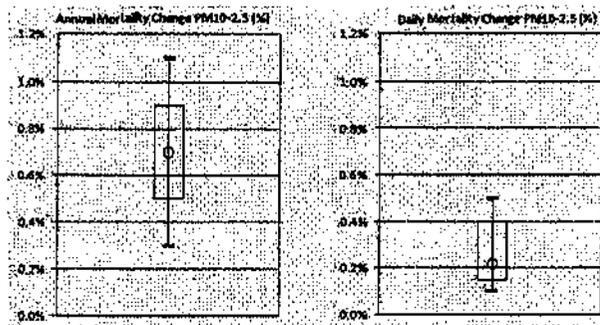
En esta etapa, el experto debe cuantificar la causalidad definida en la etapa 4. Para esto, debe señalar los percentiles 2, 25, 50, 75 y 98 del porcentaje de

Relación de la norma de calidad primaria MP 2,5 con la norma de calidad primaria de MP 10

aumento de mortalidad para largo y corto plazo. De manera automática se crean gráficos de cajas que muestran las estimaciones del experto para ver los resultados más claramente (Figura 8-2).

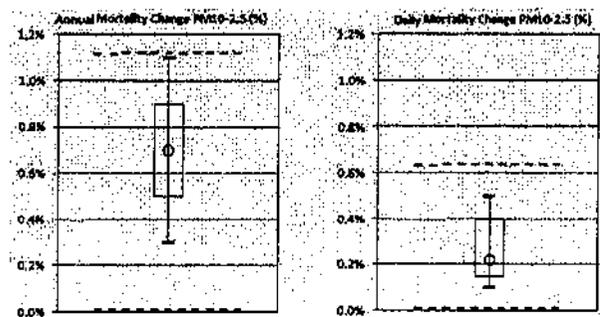
Luego, se muestra en los gráficos el mínimo y máximo aumento de mortalidad según los resultados de los estudios nombrados anteriormente (Figura 8-3), con lo cual el experto tiene la oportunidad de cambiar sus estimaciones. Si decide cambiar las estimaciones, se habla de "anclaje". Los cambios quedan registrados para su posterior análisis.

Figura 8-2 Ejemplo de causalidad sin anclaje



Fuente: Elaboración propia

Figura 8-3 Ejemplo de causalidad con anclaje



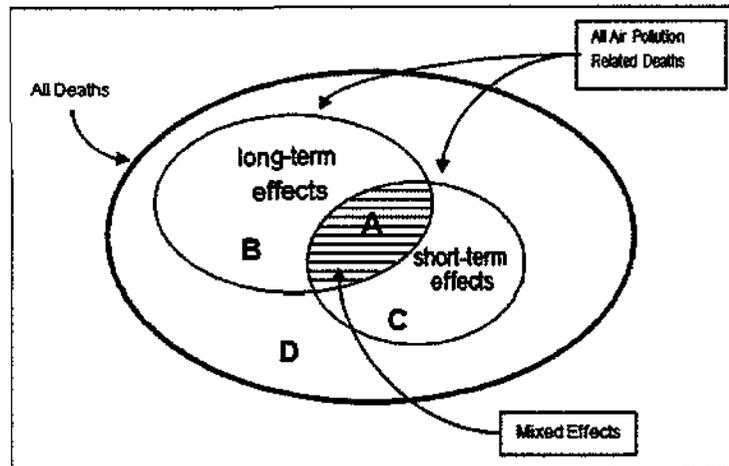
Fuente: Elaboración propia

Finalmente el experto debe señalar los estudios en los cuales basa su estimación y tiene la libertad de escribir comentarios sobre las preguntas.

8.8.1.6 Efectos de largo plazo versus de corto plazo

Primeramente en esta etapa, se realiza una introducción sobre la posibilidad de que algunos estudios de largo plazo contengan además efectos de corto plazo, lo cual es representado en la Figura 8-4.

Figura 8-4 Relación entre mortalidad asociada a exposición de largo plazo y de corto plazo



Fuente: (Künzli, Medina et al. 2001)

De acuerdo a esta figura, el experto debe establecer si está de acuerdo o no con esta representación. De ser la respuesta negativa, debe elaborar una representación de su propia percepción. Por otro lado, si está de acuerdo, debe cuantificar la participación de los efectos de corto plazo en los de largo plazo indicando la media, el mínimo y el máximo de su estimación.

8.8.1.7 Transferencia de efectos de mortalidad

La finalidad de esta etapa es conocer si la localidad es relevante a la hora de considerar los estudios presentados. Para esto, primero se muestra un grupo de estudios de meta-análisis internacionales y cuáles son sus estimaciones de aumento de riesgo de mortalidad por exposición a MP fino.

Relación de la norma de calidad primaria MP 2,5 con la norma de calidad primaria de MP 10

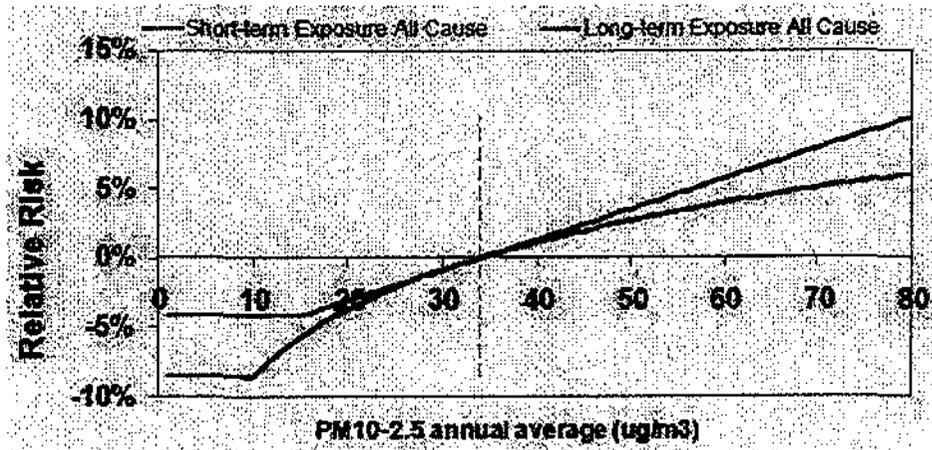
Luego, al experto se le pregunta, para MP fino y grueso, si considera que el aumento de mortalidad está relacionado con la localidad, a lo que debe argumentar su respuesta.

Finalmente, el experto debe responder si para la etapa 5 consideró importante, para cada estudio, la población de la localidad, el país donde se realizó o la ciudad donde se realizó.

8.8.1.8 Forma de la función concentración-respuesta

Para esta etapa, el experto debe indicar cuál es la relación entre la concentración ambiental de MP grueso a la cual está expuesta la población y el aumento en el riesgo de mortalidad prematura, para corto y largo plazo.

Figura 8-5 Ejemplo de concentración-respuesta



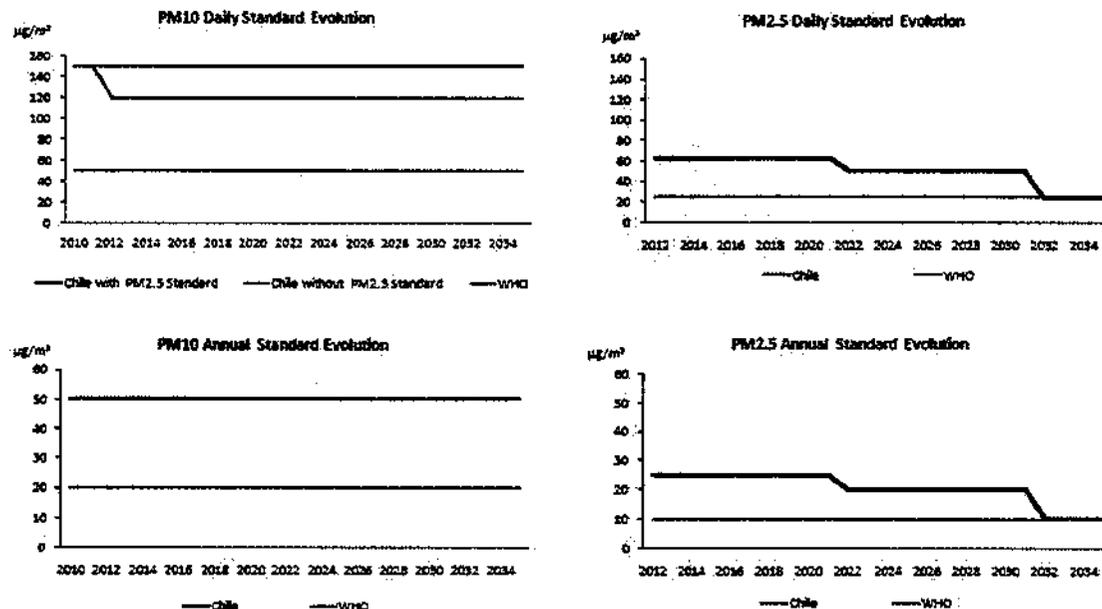
Fuente: Elaboración propia

Para esto, primero el experto debe decidir si la función se comporta linealmente o siguiendo una función log-lineal. Luego, debe establecer el umbral, si es que existe, de cada función. Un gráfico que muestra el comportamiento de la función, con los datos entregados en la etapa 5, es creado automáticamente (Figura 8-5).

8.8.1.9 Normas recomendadas

En esta etapa se muestra la evolución de las normas nacionales para MP10 y MP2,5 (en proyecto), diarias y anuales, junto con la recomendación de norma por parte de la OMS. Los cuatro gráficos se muestran en la Figura 8-6.

Figura 8-6 Evolución de normas nacionales para MP10 y MP2,5



Fuente: Elaboración propia

A continuación, el experto debe responder si, en base a sus conocimientos sobre los efectos a la salud provocados por el MP grueso, recomendaría la remoción de la norma que regula la concentración de MP10 anual o diaria, si es que la norma de MP fino es aprobada.

8.8.1.10 Confundentes

La EPA (2009) (2009) define a lo confundente como aquellas variables que afectan tanto a la exposición como a la respuesta de manera independiente. En este caso corresponde a una variable que puede afectar tanto el aumento de mortalidad como la concentración ambiental de MP10-2,5. Los confundentes

deben ser controlados en cualquier estudio epidemiológico, ya que, de lo contrario, pueden sesgar las estimaciones realizadas.

Para la encuesta se consideró la siguiente lista de confundentes:

- Uso de alcohol
- Historial de fumador
- Dieta
- Historial de ocupación
- Estado de salud preexistente
- Tendencias temporales
- Clima
- Co-contaminantes gaseosos
- Variables socioeconómicas
- Otras

Para cada variable confundente, el experto debe sostener si este es importante y si el sesgo que produce subestima, sobreestima o es neutro. Además, debe evaluar la importancia de este sesgo asignándole de 1 a 3 puntos. Esto debe ser realizado para cada uno de los estudios presentados en la etapa 3.

8.8.1.11 Modificación de efectos

Un modificador de efectos es aquella variable que es capaz de cambiar la intensidad de la relación entre la exposición y la respuesta para diferentes grupos de personas (EPA 2009). Los modificadores de efectos considerados en la encuesta corresponden a las mismas variables consideradas como confundentes y el experto debe clasificarlos de la misma manera que a los confundentes.

8.8.1.12 Problemas de exposición

Este ítem se refiere a las variables que pueden influir en la estimación de la exposición de la población al MP grueso. Las variables consideradas en este caso son las siguientes:

- Locación de los monitores (centrales o individuales)
- Tiempo de exposición relevante
- Tamaño de partículas (MP10 vs. MP2,5)
- Concentraciones vs. exposición
- Error de la medición
- Diferencias en las características de los hogares
- Diferencias en la composición del MP o en las fuentes (regional, temporal, etc.)
- Otros

Al igual que para los otros tipos de sesgos, el experto deberá clasificar cada uno de estos problemas de exposición según su importancia y sesgo y cuantificarla, para cada uno de los estudios.

Luego de realizada la encuesta a cada uno de los expertos, se recopilan y analizan los datos. Posteriormente, se les vuelve a realizar la encuesta a cada experto, pero esta vez, con el conocimiento de las respuestas que entregaron en la primera encuesta. Esto permite que cada experto reconsidere sus respuestas y, a la vez, se analiza el sesgo producido por dicha información adicional.

Como se mencionó antes, para mantener la confidencialidad de las respuestas, a cada experto se le asigna una letra al azar, por lo que durante la segunda encuesta, el experto no conocerá los juicios personales de sus colegas, sino solamente el análisis conjunto de todo el grupo.

8.9 Medidas GEC

Esta sección describe con mayor detalle el análisis de las medidas asociadas al período de GEC.

8.9.1 Zonas analizadas en el análisis de norma diaria

A continuación se listan las ciudades que fueron consideradas en el análisis de la norma diaria de MP_{2,5}.

Tabla 8-19 Lista de ciudades consideradas en el análisis de la norma diaria de MP_{2,5}

Ciudades consideradas en el análisis			
Alto Hospicio	Copiapó	Osorno	San Vicente
Angol	Curicó	Ovalle	Sierra Gorda
Antofagasta	Gran Concepción	Pozo Almonte	Talca
Arauco	Gran Santiago	Puchuncavi	Tocopilla
Arica	Gran Temuco	Puerto Montt	Valdivia
Cabildo	Gran Valparaíso	Punta Arenas	
Calama	Huasco	Putendo	
Caldera	Iquique	Quillota	
Catemu	La Calera	Quintero	
Cauquenes	La Serena-Coquimbo	Rancagua	
Chañaral	Linares	Rengo	
Chillan	Llaillay	Requinoa	
Codegua	Los Andes	San Antonio	
Coihaique	Los Angeles	San Carlos	
Constitución	Mejillones	San Felipe	
Copiapó	Nueva Imperial	San Fernando	

Fuente. Elaboración Propia

8.9.2 FCE utilizados en el análisis de GEC

En este caso se utilizan distintos FCE que para el caso anual, pues para el periodo de GEC existen condiciones especiales, como por ejemplo menor capacidad de ventilación de la cuenca, que cambian la relación entre emisiones y concentraciones. Es de esperar entonces que una unidad de contaminante emitida en otoño o invierno implique mayores concentraciones de contaminantes ambientales que una emitida primavera o verano.

La siguiente tabla resume los FCE-EC anuales utilizados según episodio para algunas ciudades. Cabe destacar que para estimar emisiones diarias estos deben dividirse por 365.

Tabla 8-20 FCE-EC utilizados en el presente estudio según episodio (ton/(ug/m³)/ año).

Ciudades	Episodio	PM25	NOX	SOX
	Alerta	7	815	2.531
Tocopilla	Preemergencia	5	599	1.860
	Emergencia	4	395	1.227
	Alerta	46	1.269	858
Gran Valparaíso	Preemergencia	34	932	631
	Emergencia	22	615	416
	Alerta	75	2.073	1.402
Gran Santiago	Preemergencia	55	1.523	1.030
	Emergencia	36	1.006	680
	Alerta	278	578	1.840
Gran Concepción	Preemergencia	204	424	1.352
	Emergencia	135	280	892
	Alerta	80	2.234	1.511
Gran Temuco	Preemergencia	59	1.642	1.110
	Emergencia	39	1.084	733

Fuente: Elaboración propia

8.9.3 Restricción Vehicular

8.9.3.1 Estimación de costos

Para estimar los costos asociados a la restricción vehicular es necesario estimar el ahorro que implica la no utilización del automóvil y el costo que implica la utilización del transporte público. Para el cálculo de ambos componentes se han considerado valores correspondientes a la ciudad de Talca para asignarlos a todas las zonas analizadas exceptuando los valores del Gran Santiago donde fueron utilizados datos propios de la zona.

Los ahorros provocados a la no utilización del automóvil vienen dados por el ahorro en combustible, en el desgaste de los neumáticos y en el uso de lubricantes. El ahorro asociado a los neumáticos y lubricantes corresponde a 2,35 \$/km y 2,55 \$/km respectivamente para todas las zonas analizadas (CONAMA 2008). Para el cálculo de ahorro de combustible se requiere utilizar el rendimiento promedio de los automóviles y el precio del combustible. Estos parámetros se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 8-21 Parámetros utilizados para el cálculo de ahorro de combustible

	Gran Santiago	Talca	Fuente
Rendimiento Promedio (km/lt)	12	14	DICTUC (2008)
Precio del Combustible (\$/lt)	341	341	MIDEPLAN (2010)
Ahorro asociado al uso de combustible (\$/km)	28,5	24,4	

Así, el ahorro asociado a la restricción vehicular es de 33,3 \$/km para el Gran Santiago y de 29,3 \$/km para las demás zonas consideradas.

Por su parte, los costos provocados por la aplicación de restricción vehicular constan de una componente asociada al pago de la utilización del transporte público y de una asociada al costo de tiempo perdido por el uso del transporte